



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**MONITOROVACÍ ZAŘÍZENÍ PRO KVASNÉ PROCESY
VYUŽÍVAJÍCÍ TERMODYNAMICKÉ SENZORY**

MONITORING EQUIPMENT FOR FERMENTATION PROCESSES USING THE THERMODYNAMIC SENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Jáneš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Adámek, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Pavel Jáneš

ID: 203528

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Monitorovací zařízení pro kvasné procesy využívající termodynamické senzory

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou monitorování kvasných procesů v potravinářství. Seznamte se s činností termodynamických senzorů a možnostmi jejich využití pro monitorování kvasných procesů. Seznamte se s mikrokontrolérem ESP32, jeho možnostmi a programováním.

Realizujte řídicí jednotku pro jednoduché zařízení monitorující kvasné procesy v potravinářství pomocí termodynamických senzorů. Řídicí jednotka bude ovládána pomocí mikrokontroléru řady ESP32. Napište obslužný program a proveďte experimentální měření pro ověření funkčnosti zařízení. Zhodnotte Vaše řešení a jeho možnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Martin Adámek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na návrh a realizaci prototypu zařízení, které má sloužit k monitorování kvasných procesů v potravinářství pomocí termodynamických senzorů. Práce obsahuje stručný popis kvasných procesů v potravinářství a také možné metody jejich monitorování. Dále se zabývá principem termodynamického senzoru a popisem mikrokontroléru ESP32, který je jádrem prototypu. Následně se zabývá návrhem prototypu včetně obslužného programu pro ESP32, který je schopen monitorovat kvasný proces pomocí dvojice termodynamických senzorů a dle nastavení uživatelem naměřená data zasílat na cloudovou službu ThingSpeak, do osobního počítače a případně je ukládat do paměti Flash. Dále se práce zabývá testováním výsledného prototypu při experimentálních měřeních, při kterých byly s prototypem monitorovány kvasné procesy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kvasný proces, potravinářství, termodynamický senzor, ESP32, experimenty

ABSTRACT

The bachelor's thesis is focused on the design and implementation of a prototype device that is to be used to monitor fermentation processes in the food industry using thermodynamic sensors. The work contains a brief description of fermentation processes in the food industry and also possible methods of their monitoring. It also deals with the principle of the thermodynamic sensor and the description of the ESP32 microcontroller, which is the core of the prototype. Subsequently, it deals with the design of a prototype, including a program for ESP32, which is able to monitor the fermentation process using a pair of thermodynamic sensors and send the measured data to the cloud service ThingSpeak, to a personal computer or store them in Flash memory. Furthermore, the work deals with testing in experimental measurements, in which fermentation processes were monitored with the prototype.

KEYWORDS

Fermenting process, food industry, thermodynamic sensor, ESP32, experiments

JÁNEŠ, Pavel. *Monitorovací zařízení pro kvasné procesy využívající termodynamické senzory* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127043>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Martin Adámek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Pavel Jáneš*

VUT ID studenta: *203528*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2019/20*

Téma závěrečné práce: *Monitorovací zařízení využívající termodynamické senzory pro kvasné procesy*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **8. června 2020**

.....
Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Adámkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval firmě Arrs Elektronik za zapůjčení přístrojů a laboratorních prostor při stavbě prototypu.

OBSAH

Úvod	1
1 Kvasné procesy v potravinářství a způsoby jejich monitorování	2
1.1 Kvasné procesy v potravinářství.....	2
1.1.1 Anaerobní kvašení v potravinářství	2
1.1.2 Aerobní kvašení v potravinářství	3
1.2 Způsoby monitorování kvasných procesů	3
1.2.1 Analytické metody monitorování kvasných procesů.....	3
1.2.2 Využití biosenzorů pro monitorování kvasných procesů	4
1.2.3 Využití termodynamických senzorů pro monitorování kvasných procesů	4
1.3 Termodynamický senzor.....	5
1.3.1 Termodynamický senzor 1. řádu	5
1.3.2 Termodynamický senzor 2. řádu	6
1.3.3 Zvýšení citlivosti termodynamického senzoru	6
1.3.4 Vlivy působící na termodynamický senzor	7
2 Mikrokontrolér ESP32	8
2.1 Modul ESP32-WROOM-32	8
2.2 Programování ESP32	9
3 Návrh hardware a realizace prototypu	10
3.1 Zapojení modulu ESP32	10
3.2 Termodynamické senzory	11
3.3 Uživatelské rozhraní	12
3.4 Převodník UART/USB	14
3.5 Napájecí zdroje	15
3.6 Realizace prototypu	15
4 Popis obslužného testovacího software pro ESP32	17
4.1 Program pro ESP32	17
4.2 Sběr dat	20
5 Testování zařízení	22
5.1 Regulátor teploty.....	22

5.2	Experimentální měření.....	23
5.2.1	Testování první konfigurace snímačů.....	24
5.2.2	Testování druhé konfigurace snímačů	27
5.2.3	Některé příklady nevhodných konfigurací snímačů	29
6	Závěr	32
	Literatura	34
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	36
	Seznam obrázků	37
A	Návrh zařízení	38
A.1	Obvodové zapojení prototypu.....	38
A.2	Deska plošného spoje prototypu – top (strana součástek)	39
A.3	Deska plošného spoje prototypu – bottom (strana spojů).....	40
A.4	Osazovací plán prototypu	41
B	Seznam součástek	42
C	Přiložené soubory	44

ÚVOD

Kvasné procesy jsou hojně využívány v potravinářském průmyslu například za účelem úpravy nebo výroby určitých potravin. Tyto procesy probíhají vždy díky mikroorganismům, které pomocí nich získávají energii. Důsledkem těchto procesů je také vznik určitého množství tepla jako vedlejšího produktu. Vzniklé teplo je možné použít pro charakterizaci, monitoring nebo stanovení konce kvasných procesů a je možné jej měřit pomocí tzv. termodynamických senzorů.

Tato bakalářská práce se zabývá krátkým přehledem kvasných procesů používaných v potravinářském průmyslu a způsoby jejich monitorování včetně popisu principu termodynamických procesů. Především se zabývá návrhem a realizací prototypu zařízení, které je schopné pomocí termodynamických senzorů monitoringu kvasného procesu a ověření funkčnosti výsledného zařízení při experimentálních měření.

Předností výsledného prototypu je možnost bezdrátového zasílání naměřených dat na cloudovou službu díky modulu ESP32, které je jádrem zařízení. Mimo jiné je možné zasílání dat pomocí sběrnice USB a případně také ukládat do paměti modulu ESP32. Data je tak dále možné zpracovávat na osobním počítači.

1 KVASNÉ PROCESY V POTRAVINÁŘSTVÍ A ZPŮSOBY JEJICH MONITOROVÁNÍ

Kvasný proces je rozklad organických látek pomocí enzymů mikroorganismů, díky kterému tyto mikroorganismy získávají energii. Vedlejší produkty tohoto rozkladu, které lze použít pro monitorování těchto procesů, jsou energeticky chudší látky a teplo. Tohoto biochemického procesu je využíváno v různých oblastech potravinářství, především v pivovarnictví, lihovarnictví, vinařství, pekařství, ale také při výrobě mléčných výrobků. V této kapitole jsou stručně popsány kvasné procesy, které se používají v potravinářském průmyslu, a některé způsoby jejich monitorování.[1][2]

1.1 Kvasné procesy v potravinářství

Kvasné procesy se dají rozdělit na dva typy, které se liší v tom, jestli probíhají za přístupu kyslíku, nebo nikoliv. Pokud probíhají za přístupu kyslíku, označují se tyto procesy jako aerobní kvašení, v opačném případě jako anaerobní kvašení. V potravinářství jsou využívány hlavně anaerobní druhy kvašení. Mezi používané druhy anaerobního kvašení patří alkoholové, mléčné, máselné a propionové kvašení. Mezi používané druhy aerobního kvašení patří citronové a octové kvašení. [1]

1.1.1 Anaerobní kvašení v potravinářství

Při alkoholovém kvašení jsou přeměňovány sacharidy na ethanol a oxid uhličitý. Mikroorganismy zodpovědné za alkoholové kvašení jsou kvasinky rodu *Saccharomyces* a *Kluyveromyces*. Tento druh kvašení má v potravinářství zásadní význam hlavně při výrobě alkoholických nápojů. V pivovarnictví se využívá ke kvašení ječmenného sladu, kdy vzniká určité množství ethanolu a oxid uhličitý. Podobně se využívá v lihovarnictví a vinařství ke kvašení cukrů, které jsou obsaženy v ovocných plodech. Dále se využívá v pekařství ke kynutí těsta, ke kterému dochází díky vzniku oxidu uhličitého, přičemž vzniklý ethanol se v tomto případě z těsta odpaří při pečení. [1][2]

Mléčné kvašení probíhá buď pomocí homofermentativních mléčných bakterií rodu *Streptococcus* a *Lactococcus*, které rozkládají sacharidy na kyselinu mléčnou, nebo heterofermentativních mléčných bakterií například rodu *Lactobacillus*, které sacharidy rozkládají rovněž na kyselinu mléčnou, ale také na oxid uhličitý a ethanol. Tento druh kvašení je velice náročný na podmínky prostředí, teplotní stabilitu a hygienu. Na tomto kvasném procesu je založeno sýrařství a výroba kvašených mléčných nápojů, například kysaného mléka, acidofilního mléka nebo kefíru. Samovolného mléčného kvašení se využívá i ke konzervaci zeleniny, jako je například zelí a okurek, protože tento druh kvašení zabráňuje rozvoji hnilobných bakterií. [1][2][3]

Máselné kvašení je typické pro bakterie rodu *Clostridium*, které rozkládají sacharidy na kyselinu máselnou za vzniku vodíku a oxidu uhličitého. Některé druhy bakterií tohoto rodu, například *Clostridium Butyricum*, rozkládají sacharidy kromě kyseliny máselné i na butanol. Tento druh kvašení je nežádoucí při výrobě sýrů, neboť způsobuje nežádoucí duření sýrů vlivem vzniku velkého množství plynů. Dále se

využívá k výrobě pšeničného škrobu kysáním. [1][2]

Propionové kvašení probíhá díky tzv. propionovým bakteriím rodu *Propionibacterium*. Při tomto kvasném procesu vzniká kyselina propionová a oxid uhličitý. Tento proces lze v potravinářství využít ke kvasné přípravě propionátu, což je anion kyseliny propionové, který se ve formě vápenaté soli používá jako protiplísňové činidlo. [2]

1.1.2 Aerobní kvašení v potravinářství

Aerobní kvašení probíhá za přístupu vzduchu. V potravinářství se tento typ používá poněkud méně, avšak má také svůj význam. Mezi tento typ kvašení patří citronové a octové kvašení.

Při citronovém kvašení dochází k rozkladu sacharidů na kyselinu citronovou pomocí kmenů plísně *Aspergillus niger*. V potravinářství se této plísně využívá právě ke kvasné přípravě kyseliny citronové, která má své využití jako dochucovací prostředek do nápojů a jídel. [1]

Octové kvašení zajišťují bakterie rodu *Acetobacter*, které rozkládají ethanol na kyselinu octovou. V potravinářství se proto tohoto procesu používá k výrobě octa. [1]

1.2 Způsoby monitorování kvasných procesů

Existuje několik analytických metod, které lze použít k monitorování kvasných procesů a ke stanovení vlastností kvašených potravin. Tyto metody jsou založeny na stanovení kyselosti roztoku, analýze organických kyselin a stanovení koncentrace kyselin. Mezi tyto metody patří potenciometrická a kalorimetrická metoda stanovení pH, acidobazická titrace, chromatografické metody a kapilární elektroforéza. Pro monitorování kvasných procesů je také využíváno biosenzorů. Jednoduchou neanalytickou metodou může být použití termodynamických senzorů. [2][3][4]

1.2.1 Analytické metody monitorování kvasných procesů

Kalorimetrickou a potenciometrickou metodou lze stanovit pH roztoku. Při kalorimetrické metodě se přidává do zkoumaného roztoku vhodný indikátor. Následně je porovnávána barva standardního roztoku se shodným indikátorem s barvou zkoumaného roztoku. Touto metodou lze odhadnout pH s přesností až 0,1 pH [3]. Častěji se využívá přesnější potenciometrické metody, kterou lze stanovit koncentraci vodíkových iontů v roztoku. Tato elektrochemická metoda je založena na měření rovnovážného napětí galvanického článku, který je tvořen dvěma elektrodami: referenční elektrodou a indikační elektrodou. Tyto dvě elektrody jsou ponořeny do roztoku o známé teplotě, přičemž potenciál referenční elektrody je konstantní a potenciál indikační elektrody je úměrný koncentraci vodíkových iontů. Měřením rovnovážného napětí, které je dáno rozdílem potenciálů referenční a indikační elektrody lze tedy stanovit koncentraci vodíkových iontů a tím i pH. [3][4]

Pomocí titrace lze stanovit koncentraci kyseliny v roztoku. Do baňky s roztokem o známém objemu a neznámou koncentrací kyseliny je přidán indikátor, např.

fenolftalein, který je v kyselých roztocích bezbarvý a v zásaditých roztocích se barví do růžova. Následně je do tohoto roztoku přidáván zásaditý roztok o známé koncentraci, dokud není roztok zcela neutralizován. Koncentraci kyseliny lze poté stanovit z objemu a koncentrace zásaditého roztoku. [3]

K analýze organických kyselin je možné použít chromatografických metod, při kterých lze zkoumat množství organických kyselin v roztoku. Při chromatografii dochází k separaci složek obsažených ve vzorku. Tento vzorek se vnáší mezi nepohyblivou stacionární fázi a pohyblivou mobilní fázi. Tyto dvě fáze jsou nemísitelné. Vzorek je pomocí mobilní fáze unášen přes stacionární fázi, ve které mohou být některé složky zachycovány, a proto se při pohybu zdržují. Tím dochází k separaci složek, protože na konec stacionární fáze se dostanou později složky, které jsou stacionární fází zachycovány. Na konci stacionární fáze jsou tyto složky detekovány. Při plynové chromatografii je v případě organických analýzy kyselin nejprve nutná příprava těkavých derivátů těchto kyselin v roztoku. Tyto deriváty jsou následně vstřikovány do proudu nosného plynu v plynovém chromatografu, který je dále unáší kolonou, která tvoří stacionární fázi. Deriváty jsou zachycovány v koloně a na konci jsou detekovány plamenovým ionizačním detektorem. Častěji používaná je kapalinová chromatografie, protože při ní není potřeba příprava těkavých derivátů organických kyselin. V případě kapalinové chromatografie je mobilní fází kapalina. Složky jsou následně detekovány ultrafialovým nebo infračerveným detektorem. [3][4]

Poslední zmiňovaná analytická metoda je kapilární elektroforéza, která opět slouží k separaci složek v roztoku a ke stanovení množství organických kyselin v tomto roztoku. Při této metodě je do kapiláry o vnitřním průměru 50 μm a délky až 1 m vneseno několik nanolitů roztoku. Konce kapiláry jsou ponořeny v zásobnících s elektrolytem společně s elektrodami. Na elektrody je přiloženo vysoké napětí až 30 kV, které způsobí pohyb elektricky nabitých molekul. Uvnitř kapiláry tak dochází k migraci organických kyselin, které jsou záporně nabitě, směrem od neutrálních nebo kladně nabitých molekul, jako jsou například cukry. Kyseliny jsou následně detekovány UV detektorem, přes který kapilára přechází. [3][4]

1.2.2 Využití biosenzorů pro monitorování kvasných procesů

Biosenzor se skládá ze dvou částí. První část je bioaktivní element, který dává formou detekovatelných reakcí výstupní signál druhé části, kterou je převodník signálu produkovaného bioaktivním prvkem na elektrický signál. Jako bioaktivní prvek lze použít například enzymy, protilátky nebo nukleové kyseliny. Detekovatelné reakce mohou být tedy například enzymaticky katalyzované reakce nebo je možné detekovat přímo určitý druh molekul. Pro monitorování kvasného procesu tak lze například využít biosenzorů pro stanovení koncentrací sacharidů v roztoku. [5]

1.2.3 Využití termodynamických senzorů pro monitorování kvasných procesů

Vzhledem k tomu, že při kvasných procesech vzniká jako vedlejší produkt teplo, mohou pro tyto účely najít uplatnění termodynamické senzory. Jednalo by se tak o jednoduchou neanalytickou metodu, pomocí které by byl například stanoven konec kvasného procesu. Termodynamické senzory se obecně dají použít pro monitorování

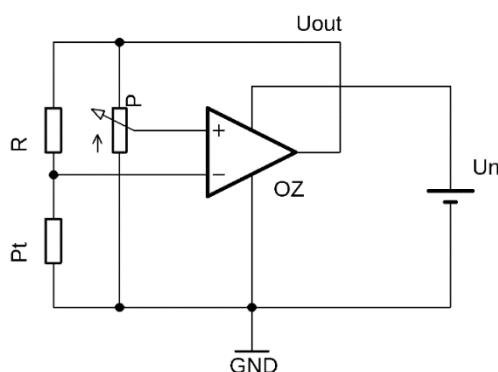
a charakterizaci teplotních procesů v různých termodynamických systémech. První experimentální měření, která ukazují, že by termodynamické senzory mohly být využity k monitorování a charakterizaci kvasných procesů, byly publikovány v [6].

1.3 Termodynamický senzor

Termodynamický senzor (TDS) je aktivní prvek monitorované termodynamické soustavy, který má jednoznačně určen bilanční předpis dodávky energie tak, aby docházelo k udržení jemu vlastní bilanční rovnováhy s monitorovanou soustavou. Tento předpis je dán jeho konstrukčním uspořádáním. Součástí je bilanční zapojení, které zajišťuje dodávku energie termodynamickému senzoru podle daného bilančního předpisu. Tím dochází k udržení bilanční rovnováhy senzoru s monitorovanou soustavou v závislosti na jejich okamžité interakci. Podle počtu teplotně závislých teplotních snímačů v zapojení termodynamického senzoru lze tyto senzory dělit na termodynamický senzor 1. řádu a 2. řádu. [7]

1.3.1 Termodynamický senzor 1. řádu

Základní zapojení termodynamického senzoru 1. řádu v bilančním zapojení je na obr. 1. Zapojení je tvořeno jedním teplotně závislým rezistorem P_t , jedním teplotně nezávislým rezistorem R a bilančním zapojením, které tvoří operační zesilovač OZ a potenciometr P .



Obr. 1 Zapojení termodynamického senzoru 1. řádu podle [4]

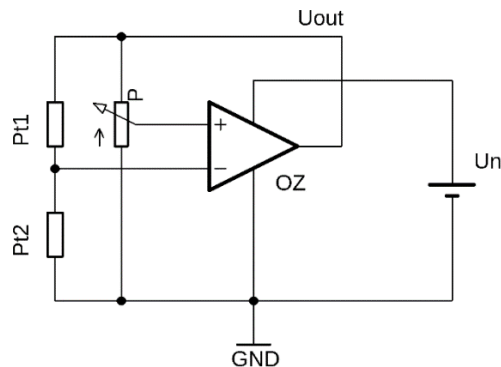
Princip činnosti tohoto zapojení spočívá v udržení nulového rozdílového napětí mezi vstupy operačního zesilovače. Tato podmínka je splněna, pokud je dělicí poměr α potenciometru P shodný s dělicím poměrem rezistoru R a P_t (1).

$$\alpha = \frac{P_t}{R + P_t} [-] \quad (1)$$

Operační zesilovač bude držet teplotně závislý rezistor na konstantní teplotě, která je nastavena potenciometrem P . Při změně teploty v okolí rezistoru P_t , a tedy i změně hodnoty odporu rezistoru P_t , upraví operační zesilovač výstupní napětí tak, aby ztrátový výkon na rezistoru P_t vyvolal změnu jeho odporu a zajistil opět nulové rozdílové napětí mezi vstupy operačního zesilovače. [7]

1.3.2 Termodynamický senzor 2. řádu

Základní zapojení termodynamického senzoru 2. řádu je na obr. 2. Toto zapojení se skládá ze dvou částí. První část je můstkové zapojení dvojice teplotních snímačů P_{t1} a P_{t2} , které jsou tvořeny teplotně závislými rezistory a potenciometrem P . Oba snímače P_{t1} a P_{t2} mají stejný teplotní koeficient odporu (TCR), avšak P_{t2} má zpravidla větší hodnotu odporu. Druhá část je bilanční zapojení s operačním zesilovačem OZ.



Obr. 2 Zapojení termodynamického senzoru 2. řádu, podle [5]

Princip činnosti tohoto zapojení spočívá v udržení nulového rozdílového napětí mezi vstupy operačního zesilovače. Tato podmínka je splněna tehdy, když je dělicí poměr odporů snímačů P_{t1} a P_{t2} roven dělicímu poměru α potenciometru P . Tato podmínka je zapsána v rovnici (2).

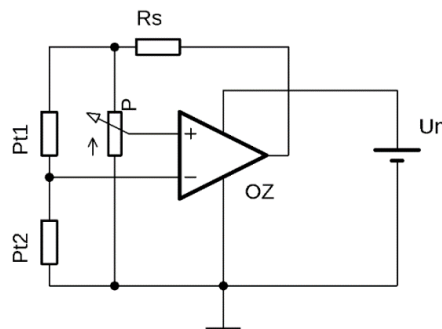
$$\alpha = \frac{P_{t2}}{P_{t1} + P_{t2}} [-] \quad (2)$$

Operační zesilovač bude držet konstantní tepelný tok mezi snímači P_{t1} a P_{t2} . Pokud dojde ke změně teploty jednoho ze snímačů P_{t1} nebo P_{t2} , a tedy i ke změně jeho odporu, upraví operační zesilovač výstupní napětí tak, aby bylo znovu dosaženo nulového rozdílového napětí mezi jeho vstupy, a tedy požadovaného tepelného toku mezi snímači P_{t1} a P_{t2} . Toho je docíleno tak, že napěťová odezva operačního zesilovače vyvolá změnu ztrátového výkonu na rezistorech P_{t1} a P_{t2} , který se mění na teplo, čímž dojde ke změně hodnot jejich odporů.

Z těchto důvodů je možné monitorovat přechodné tepelné děje v termodynamických soustavách, jelikož ustálená hodnota výstupního napětí operačního zesilovače znamená, že monitorovaná soustava se nachází v ustáleném stavu, kdežto změna tohoto napětí odpovídá přechodnému ději v této soustavě. Toto zapojení má i výhodu, že je možné dle napěťové odezvy určit směr šíření tepla, tudíž je výstupní napětí vektorovou veličinou. [7][8][9]

1.3.3 Zvýšení citlivosti termodynamického senzoru

Zvýšení citlivosti lze dosáhnout přidáním rezistoru R_s do zpětné vazby operačního zesilovače. Takto upravené zapojení termodynamického senzoru 2. řádu je na obr. 3.



Obr. 3 Upravené zapojení termodynamického senzoru 2. řádu

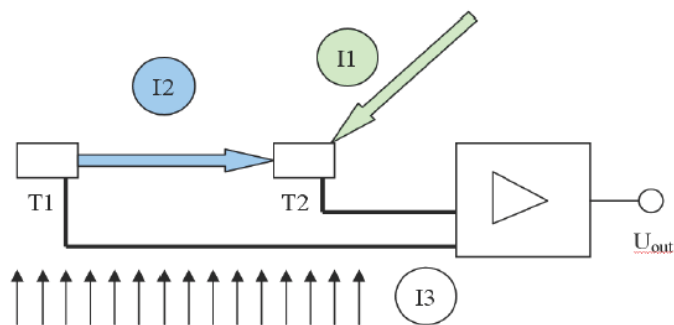
Udržení nulového rozdílového napětí mezi vstupy operačního zesilovače (udržení konstantního tepelného toku mezi snímači P_{t1} a P_{t2}) zajišťuje napětí na můstkovém zapojení, které bylo v předchozích případech rovné výstupnímu napětí operačního zesilovače. Pokud je mezi můstek a výstup operačního zesilovače zapojen rezistor R_s , musí být výstupní napětí k udržení nulového rozdílového napětí výraznější, protože část napětí (a ztrátového výkonu) je na rezistoru R_s . Poměr výstupního napětí operačního zesilovače a napětí na můstku je dán vztahem:

$$\frac{U_{VYST}}{U_S} = 1 + \frac{R_S}{R_C} [-] \quad (3)$$

Poměr napětí na výstupu operačního zesilovače U_{VYST} ku napětí na můstku U_S bude proto dán i poměrem celkového odporu můstku R_C a sériového odporu R_S . [8]

1.3.4 Vlivy působící na termodynamický senzor

V reálných podmínkách působí na termodynamický senzor skupina vlivů, které je možné rozdělit do tří skupin. Tyto vlivy jsou zobrazeny na obr. 4.



Obr. 4 Skupina vlivů působící na termodynamický senzor [5]

První skupina vlivů je označena jako I1. Tyto vlivy působí pouze na teplotu T_2 snímače E_2 . Do této skupiny lze zařadit v podstatě libovolnou fyzikální veličinu, která lze transformovat na teplo. Další skupinou jsou vlivy I2, které mění teplotní vlastnosti soustavy mezi snímači E_1 a E_2 . Poslední skupinou jsou vlivy I3, které působí společně na teplotu obou snímačů. Tato skupina vlivů nemá v ideálním případě vliv na výstupní napětí termodynamického senzoru. [6]

2 MIKROKONTROLÉR ESP32

Navrhované zařízení má řídit mikrokontrolér ESP32 firmy Espressif. Jedná se o nástupce úspěšného předchůdce s označením ESP8266, který má mnoho vylepšení a nových funkcí. Na trhu jsou kromě samotného mikrokontroléru v pouzdře QFN (Quad Flat No leads package) k dostání moduly s označením ESP32. Jedná se o SoC (System on chip) moduly, ve kterých je zabudován mikrokontrolér, externí paměť Flash a PCB (Printed circuit board) anténa. V této kapitole bude popsán modul ESP32-WROOM-32, který byl použit v navrhovaném zařízení. Následně zde budou popsány možnosti programování tohoto modulu. [10][11]

2.1 Modul ESP32-WROOM-32

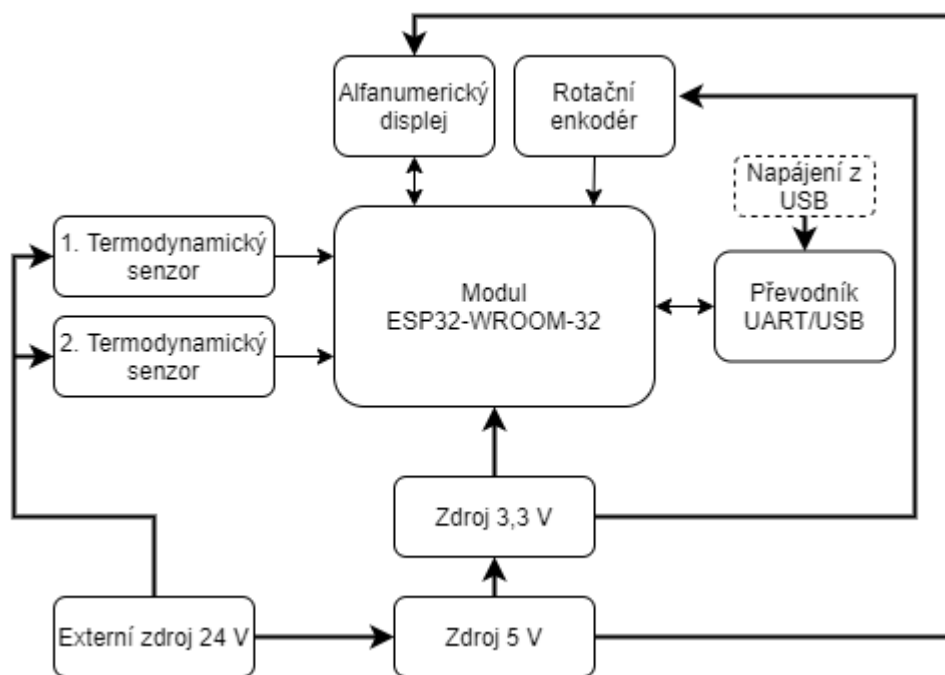
Modul lze vidět na obr. 5. a jeho vnitřní zapojení na obr. 6. Hlavní část modulu tvoří dvoujádrový mikrokontrolér ESP32-D0WDQ s jádrem Xtensa LX6, který disponuje výkonem až 600 MIPS (milion instrukcí za sekundu) při taktovacím kmitočtu 240 MHz. Mikrokontrolér má interní paměť SRAM o velikosti 520 KB a podporuje připojení externí paměti typu Flash přes sběrnici SPI. Dále poskytuje využití mnoha periférií jako například sběrnice UART, Ethernet, I²C, I²S, dále rozhraní pro připojení kapacitních dotykových snímačů, 12bitové A/D a 8bitové D/A převodníky, čítače/časovače a především integrovaný přijímač a vysílač Wi-Fi a integrovaný Bluetooth. Modul ESP32-WROOM-32 má osazenou externí paměť typu Flash o velikosti 4 MB, která je na vnitřním zapojení označena jako U3. Modul obsahuje již zmíněnou PCB anténu. Na vnitřním zapojení lze dále vidět filtrační kondenzátory napájecího napětí digitální části mikrokontroléru označené jako C4, C18 a C19, filtrační kondenzátory napájení analogové části C10 až C13, C9, C3 a C20, impedanční přizpůsobení antény tvořené dvojicí kondenzátorů C14, C15 a cívkou L4, filtrační kondenzátory C16 a C17 pro A/D převodník, filtrační kondenzátor C5 pro interní napěťovou referenci mikrokontroléru a RC článek tvořený kondenzátorem C6 a rezistorem R1 pro minimalizaci doby přechodu do deep sleep módu (režim snížené spotřeby) mikrokontroléru. Oscilátor tvoří krystal U1 a kondenzátory C1 a C2. [13][14]



Obr. 5 Vzhled modulu ESP32-WROOM-32 [12]

3 NÁVRH HARDWARE A REALIZACE PROTOTYPU

Na obr. 7 je blokové schéma navrhovaného prototypu. Prototyp je napájený externím zdrojem s napětím 24 V. Jádrem prototypu je modul ESP32-WROOM-32. Prototyp obsahuje dva termodynamické senzory, aby bylo možné porovnávat naměřená data mezi aspoň dvěma senzory, aby byl možný monitoring při dvou různých konfiguracích teplotních snímačů zároveň nebo aby byl prototyp schopný provozu například při poruše jednoho ze senzorů. Senzory jsou kvůli měřicímu rozsahu napájeny přímo ze zdroje 24 V. Výstup senzorů je čten A/D převodníkem v modulu ESP32. Uživatelské rozhraní tvoří LCD displej a rotační enkodér. Pro nahrání programu pro ESP32 a posílání dat přes sběrnici USB do osobního počítače obsahuje prototyp převodník UART/USB. Dále obsahuje dva napájecí zdroje o napětích 5 V pro displej a 3,3 V pro modul ESP32. V této kapitole budou popsány jednotlivé bloky navrhovaného prototypu.

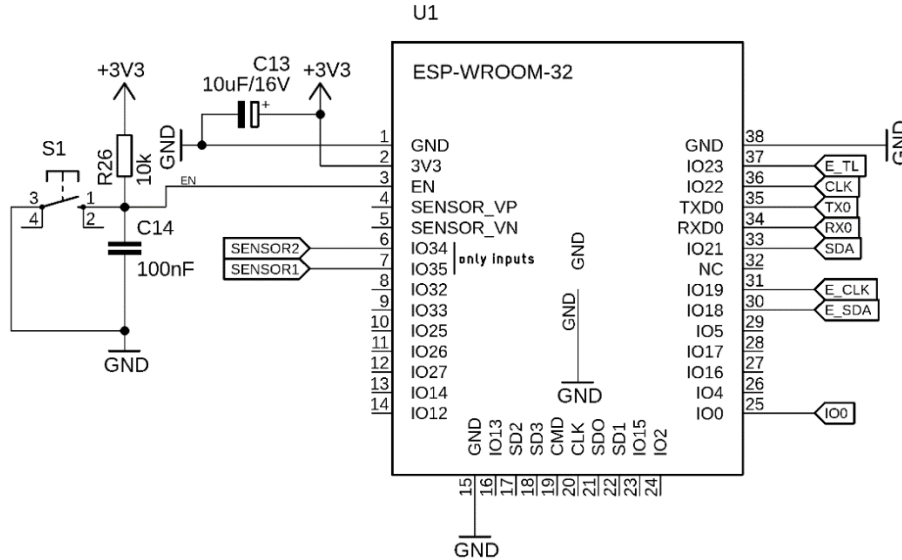


Obr. 7 Blokové schéma prototypu

3.1 Zapojení modulu ESP32

Zapojení modulu ESP32 je na obr. 8. Na napájecím pinu je proti zemi připojen filtrační elektrolytický kondenzátor C13. Na vstup EN je připojen RC článek z rezistoru R26 a kondenzátoru C14. Hodnoty byly zvoleny dle doporučení výrobce [13]. Mikropsínačem S1 je možné modul restartovat. K vstupně/výstupním pinům IO34 a IO35 jsou připojeny výstupy ze senzorů. Na piny IO18, IO19 je připojen výstup

rotačního enkodéru a na pin IO23 je připojeno tlačítko, které je součástí enkodéru. Displej je ovládán pomocí sběrnice I²C. K tomu slouží piny IO21 a IO22. Pro připojení k převodníku UART/USB slouží piny označené jako TXD0, RXD0 a IO0.



Obr. 8 Zapojení modulu ESP32-WROOM-32

3.2 Termodynamické senzory

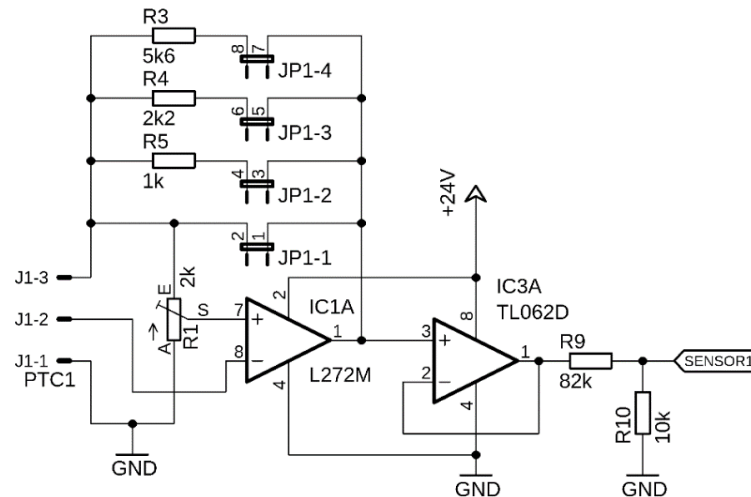
Zapojení jednoho senzoru je na obr. 9. Samotný senzor tvoří operační zesilovač IC1A. Ve zpětné vazbě je připojena dvouřadá kolíková lišta JP1 a rezistory R3, R4 a R5. Pomocí zkratovacích propojek na kolíkové liště lze pak volit citlivost senzoru podle hodnoty rezistorů. Jedna ze čtyř dvojic kolíků může pak se zkratovací tvořit zpětnou vazbu bez rezistoru. Počáteční výstupní napětí senzoru pro měření se nastavuje víceotáčkovým trimrem R1. Teplotní snímače jsou připojeny konektorem J1. Byly vybrány teplotní snímače s označením KTY81-110 a KTY81-210. Výstup senzoru je oddělen operačním zesilovačem IC3A v zapojení sledovače. Rezistory R9 a R10 tvoří napěťový dělič, který upravuje napětí pro připojení k A/D převodníku v modulu ESP32. Maximální vstupní napětí je 3,3 V, avšak dle výrobce pro vstupní napětí větší než 2,45 V roste chyba A/D převodu [16]. Pro rezistor R10 byla zvolena hodnota 10 kΩ, hodnota R9 byla dopočítána. Při napájení sledovače napětím 24 V bude dle výrobce [17] maximální výstupní napětí operačního zesilovače přibližně 22,5 V. Při požadovaném maximálním vstupním napětí A/D převodníku a maximálním výstupním napětí operačního zesilovače je výpočet odporu R9 následující:

$$U_{INM} = U_{OZM} \cdot \frac{R_{10}}{R_{10} + R_9} \rightarrow R_9 = \frac{R_{10} \cdot (U_{OZM} - U_{INM})}{U_{INM}} [\Omega] \quad (4)$$

$$R_9 = \frac{R_{10} \cdot (U_{OZM} - U_{INM})}{U_{INM}} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot (22,5 - 2,45)}{2,45} = 81,836 \text{ k}\Omega \quad (5)$$

$$R_9 \cong 82 \text{ k}\Omega \quad (6)$$

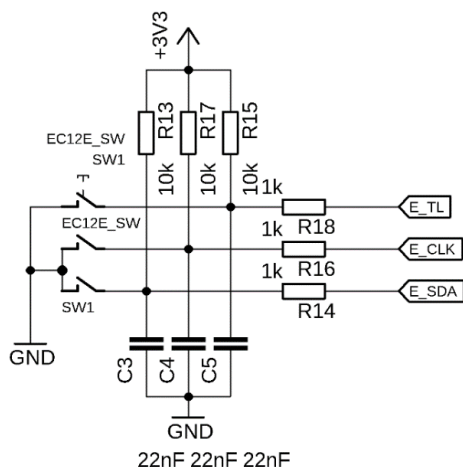
kde U_{INM} je požadované maximální vstupní napětí A/D převodníku a U_{OZM} je maximální výstupní napětí operačního zesilovače při daném napájení. Pro rezistor R9 byla zvolena nejbližší hodnota v řadě, tedy 82 kΩ.



Obr. 9 Zapojení termodynamického senzoru

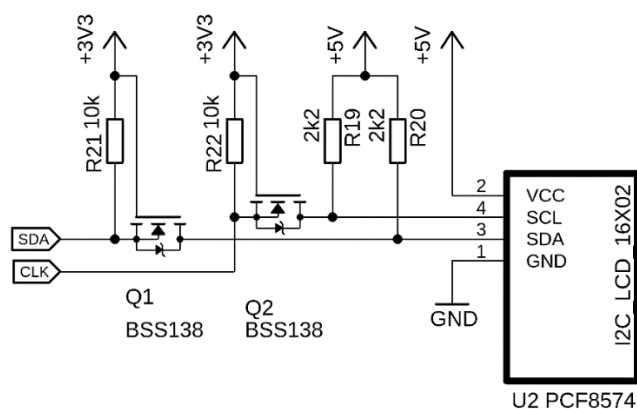
3.3 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní tvoří displej pro zobrazení nastavení zařízení a výstupních napětí senzorů a rotační enkodér, pomocí kterého bude možné ovlivňovat nastavení zařízení. Zapojení rotačního enkodéru včetně tlačítka je na obr. 10. K výstupům enkodéru jsou připojeny zvyšující (pull-up) rezistory R13, R15 a R17, aby byly definovány jeho stavy na logickou jedničku při rozpojených kontaktech, tedy na úroveň napájecího napětí 3,3 V. Napětí by nemělo být vyšší než napájecí napětí modulu ESP32, aby nedošlo k poškození vstupů modulu. Pro potlačení zákmitů jsou k výstupům připojeny kondenzátory C3, C4 a C5 [18]. Jejich hodnota byla zvolena experimentálně při pokusech s rotačním enkodérem. Při úplném potlačení zákmitů pomocí vhodné napsané programu pro ESP32 je možné kondenzátory ze zapojení vypustit. Rezistory R14, R16 a R18 slouží k omezení proudu v případě, kdy by při psaní obslužného byly piny ESP32 určené pro enkodér nastaveny jako výstupy a došlo by ke spojení některého z kontaktů enkodéru.



Obr. 10 Zapojení rotačního enkodéru a tlačítka

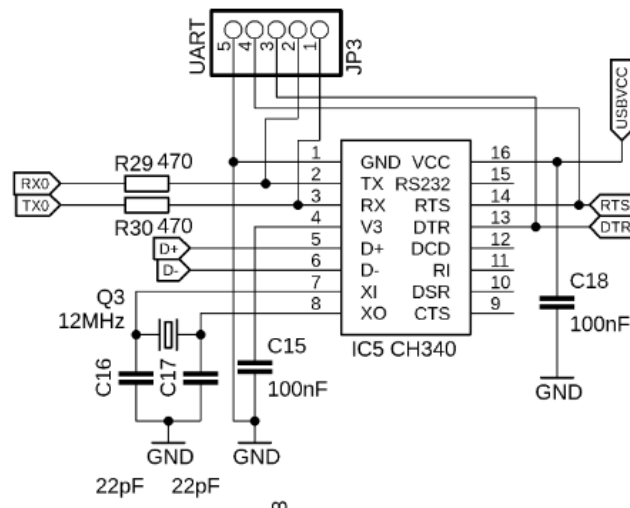
Displej byl vybrán alfanumerický dvouřádkový s řadičem SPLC780D a označením MC21605C6W-SPR-V2 bez podsvícení. Řadič komunikuje pomocí paralelní 4bitové nebo 8bitové sběrnice. Pro snížení počtu vývodů, které jsou potřebné pro ovládání displeje, byl použit expandér sběrnice I²C na paralelní 8bitovou sběrnici s označením PCF8574. Ten lze zakoupit jako hotový modul, který lze přímo připojit k vybranému displeji. Expandér je napájen napětím 5 V. Dle technické dokumentace je doporučeno minimální napětí ve vysokém stavu aspoň 3,5 V při daném napájecím napětí. Proto byly na sběrnici I²C přidány převodníky logické úrovně z 3,3 V na 5 V. Zapojení je na obr. 11. Zapojení se skládá z pull-up rezistorů R21 a R22 na napětí 3,3 V pro modul ESP32, rezistorů R19 a R20 na napětí 5 V pro expandér a tranzistory NMOS Q1 a Q2. Vzhledem k tomu, že byly použity pull-up rezistory R19 a R20 v zapojení převodníku, byly odpájeny zvyšující rezistory z modulu s expandérem. [19][20][21][22]



Obr. 11 Zapojení převodníků úrovně pro I²C sběrnici expandéru

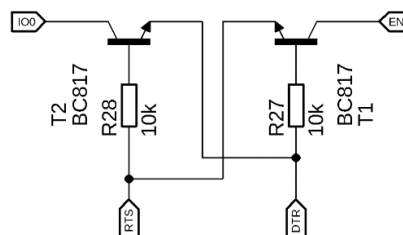
3.4 Převodník UART/USB

Pro přenos dat přes sběrnici USB a pro programování ESP32 byl použit převodník UART/USB s označením CH340, který je běžně používán na vývojových kitech s ESP32 a Arduino. Zapojení převodníku je na obr. 12. Převodník je napájen přes sběrnici USB z počítače. Dle doporučení výrobce [23] byly na napájecí pin VCC a na napěťovou referenci 3,3 V s pinem označeným jako V3 připojeny filtrační kondenzátory C18 a C15. Převodník potřebuje ke své činnosti externí oscilátor, který tvoří krystal Q3 a kondenzátory C16 a C17. Hodnoty byly vybrány dle doporučení výrobce [23]. Na piny sběrnice UART označené jako RX a TX byly připojeny rezistory R29 a R30 pro potlačení 80MHz harmonických dle doporučení výrobce ESP32 [14]. Vývody D+ a D- jsou připojeny ke konektoru USB. Na vývody RX, TX, RTS, DTR a GND je připojena kolíková lišta JP3, protože při návrhu byla zvažována možnost připojení externího modulu s převodníkem USB/UART namísto osazení převodníku na desku.



Obr. 12 Zapojení převodníku UART/USB

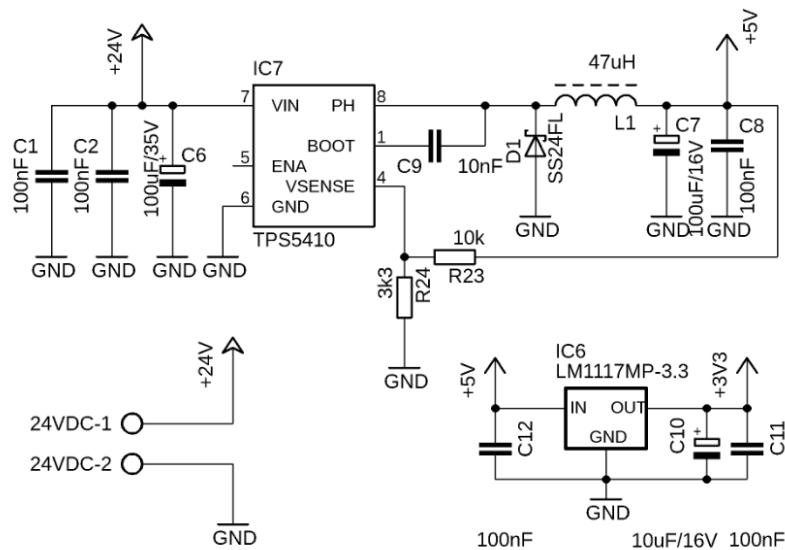
Pro naprogramování modulu ESP32 musí být jeho vývod s označením IO0 po restartu uzemněn [13]. K tomu slouží obvod na obr. 13, který je připojen k pinům EN a IO0 modulu ESP32 a řídicím signálům RTS a DTR převodníku UART/USB. Pomocí těchto řídicích signálů může být mikrokontrolér resetován a pin IO0 uzemněn, což značí, že má být nahrán nový program do paměti Flash. V případě neuzemnění pinu IO0 je po restartu spuštěn program pro ESP32 [13].



Obr. 13 Zapojení pro automatickou volbu programování/spuštění programu

3.5 Napájecí zdroje

Celý prototyp je napájen externím zdrojem s napětím 24 V. Toto napětí je použito pro napájení termodynamických senzorů. Pro napájení ESP32 je potřeba napětí 3,3 V, pro expandér s displejem pak 5 V. Dle výrobce ESP32 má být zdroj schopen dodat proud aspoň 500 mA [13]. Pro napájení ESP32 byl tedy zvolen lineární napěťový regulátor LM1117 s pevnou hodnotou výstupního napětí 3,3 V. Tento regulátor má maximální výstupní proud 800 mA [24], čímž splňuje požadavky pro napájení ESP32. Na vstupu tohoto zdroje bude připojen zdroj s výstupním napětím 5 V, který bude zároveň napájet i displej a expandér sběrnice. Vzhledem k tomu, že LM1117 je lineární napěťový regulátor, musí být 5V zdroj schopen dodat potřebný proud pro ESP32 a zároveň pro displej s expandérem, který bude oproti odběru ESP32 zanedbatelný. Při použití dalšího lineárního regulátoru, který by snížil napětí z 24 V na 5 V, by byl ztrátový výkon příliš velký. Bylo tedy rozhodnuto použít spínaný snižující měnič. Volba padla na obvod TPS5410 s výstupním proudem až 1 A [25]. Zapojení obou zdrojů je na obr. 14. Obvod LM1117 byl doplněn o filtrační kondenzátory C10, C11 a C12. Zapojení snižujícího měniče s obvodem TPS5410 bylo odladěno v prostředí WEBENCH® POWER DESIGNER firmy Texas Instruments [26].



Obr. 14 Zapojení napájecích zdrojů

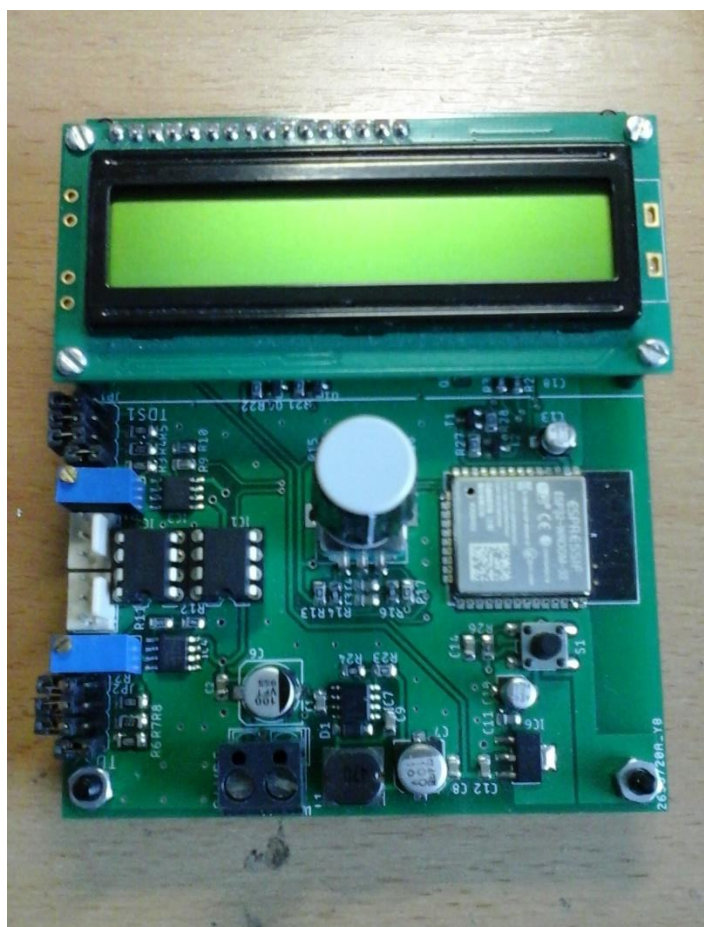
3.6 Realizace prototypu

Deska plošného spoje pro prototyp byla navržena v návrhovém programu Eagle verze 9.2.2. Výrobní podklady z návrhového systému jsou v příloze přiložené k této práci. Osazenou desku prototypu lze vidět na obr. 15. Veškeré součástky jsou osazeny ze strany součástek, přičemž byla snaha o co největší využití SMT (technologie povrchové montáže). Na levou stranu desky, podle orientace desky na obr. 15, byly umístěny senzory včetně kolíkových lišt pro volbu hodnoty odporu ve zpětné vazbě zapojení senzorů, konektorů k připojení teplotních snímačů a trimrů pro nastavení výstupního

napětí senzorů. Na pravé straně je osazen modul ESP32 s anténou orientovanou směrem ven z desky. Kolem prostoru antény není dle doporučení výrobce vylitá žádná měď z obou stran desky plošného spoje [14]. Kolem modulu ESP32 je osazen filtrační kondenzátor, resetovací tlačítko a obvod pro automatickou volbu programování nebo spuštění programu. Ve spodní části jsou osazeny napájecí zdroje a šroubová svorkovnice pro připojení externího napájecího zdroje. Uprostřed desky je rotační enkodér. K desce displeje je přímo připájen modul s expandérem sběrnice. Ten je pak připájen na desku prototypu. UART/USB převodník, USB konektor a kolíková lišta pro externí převodník k UART/USB jsou osazeny pod displejem. Pro přišroubování desky displeje k desce prototypu byly použity distanční sloupky.

Na desku prototypu byla nanášena pájecí pasta, do které byly osazeny SMD součástky na poloautomatickém osazovacím pracovišti. Následně byla deska zapájena v přetavovací peci. Zbytek součástek byl osazen a zapájen ručně.

Při oživování prototypu byla již připravena první verze obslužného programu, a tak mohla být ihned testována celková funkčnost prototypu. Při tomto testu se ukázalo, že obslužný program není schopen číst stav tlačítka. Závada byla způsobena špatným připájením vývodu modulu ESP32, ke kterému bylo tlačítko připojeno a byla opravena jednoduchým ručním zásahem.



Obr. 15 Osazená deska prototypu

4 POPIS OBSLUŽNÉHO TESTOVACÍHO SOFTWARE PRO ESP32

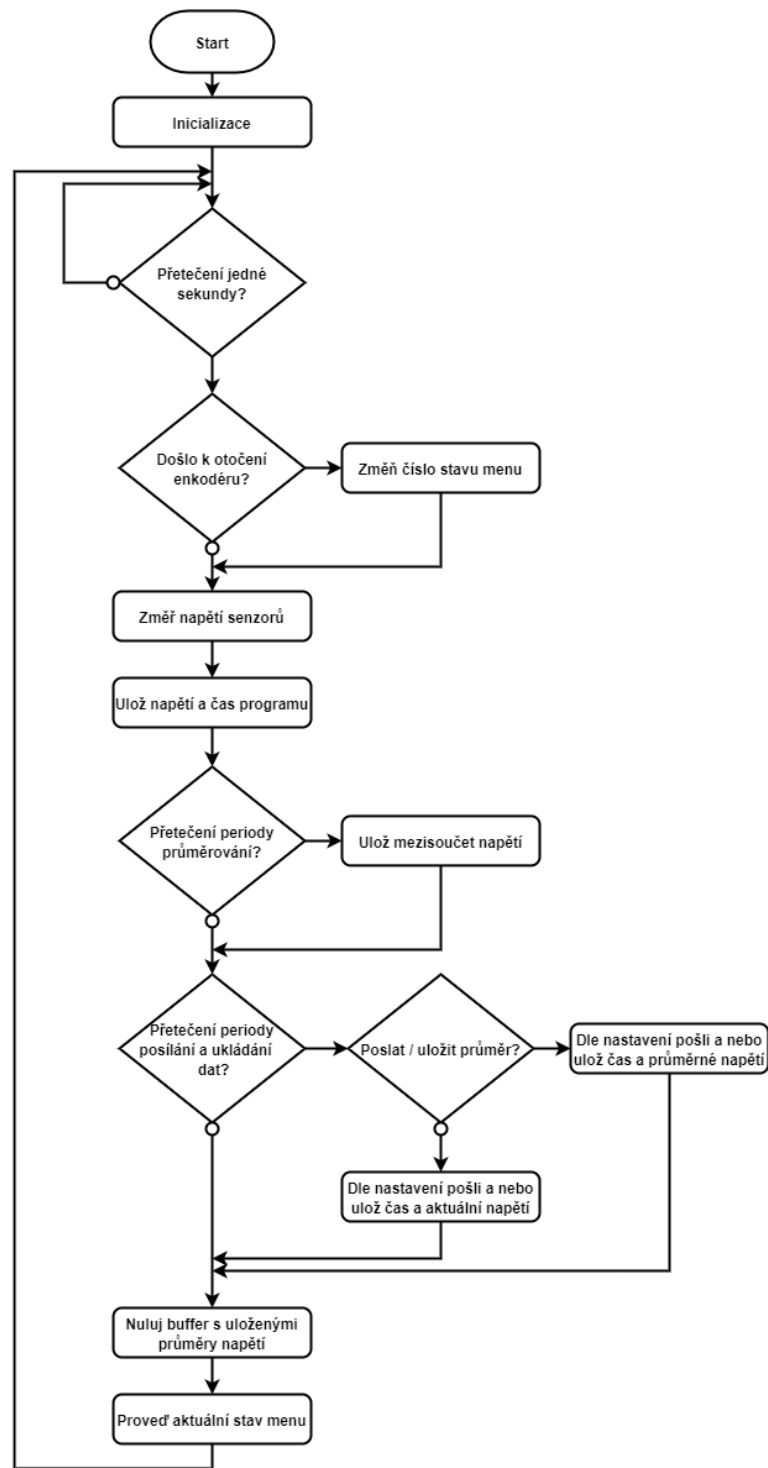
Cílem bylo vytvořit program, se kterým bude možné prototyp otestovat při experimentálním měření. S tímto programem by měl být prototyp schopen měřit a zobrazovat výstupní napětí senzorů na displej. Dále by měl být schopen v nastavitelné časové periodě posílat data pomocí Wi-Fi nebo sběrnice USB, případně je ukládat do paměti modulu ESP32. K nastavení tohoto posílání anebo ukládání dat má sloužit rotační enkodér. Takový program byl realizován a byla s ním provedena řada testů. Následně byla přidána ještě možnost průměrování výstupního napětí senzorů v dané periodě, ve které se posílají data. V této kapitole bude popsán výsledný program a také použité aplikace pro sběr dat.

4.1 Program pro ESP32

Obslužný program pro modul ESP32 byl napsán v prostředí Arduino IDE. Pro psaní programu byly použity dostupné knihovny pro ovládání displeje, vysílače Wi-Fi modulu ESP32, ovládání sběrnice I²C a knihovny pro ovládání paměti Flash modulu ESP32. Pro dílčí části programu, kterými jsou čtení stavů rotačního enkodéru, měření napětí, posílání dat, ukládání dat, a pro časovač byly napsány vlastní knihovny kvůli zpřehlednění kódu a aby bylo možné je použít v jiných programech. Vzhledem k tomu, že obslužný program je poměrně dlouhý, bude zde jeho funkce popsána za pomoci zjednodušených diagramů. Program je v příloze přiložen k této práci.

Vývojový diagram, který popisuje celý běh programu, je na obr. 16. Po zapnutí nebo restartu proběhne blok inicializace. V tomto bloku je nejprve inicializován displej, na který je pro jednoduchý test funkčnosti displeje vypsána úvodní hláška s verzí programu. Následně je inicializována paměť Flash, ve které je nejprve alokován prostor pro ukládání dat a poté je na začátek tohoto prostoru zapsána aktuální adresa pro ukládání dat. Tato adresa se zvyšuje podle velikosti aktuálně uložených dat, a tak může být při čtení z paměti přečten pouze blok paměti s uloženými daty. Dále následuje inicializace sběrnice UART a inicializace čítače/časovače, podle kterého se řídí perioda posílání dat a je čítán čas běhu programu. Následně je provedena inicializace A/D převodníku pro měření napětí senzorů a inicializace vstupů pro rotační enkodér.

Následuje hlavní smyčka programu, ve které je cyklicky ověřováno, zda nebyl v rutině přerušení časovače nastaven příznak, že uplynula jedna sekunda času. Pokud k nastavení příznaku došlo, je v dalším bloku dotazováno, zda bylo otočeno rotačním enkodérem. Pokud ne, program pokračuje na další blok. Pokud došlo k otočení enkodéru, je dle směru otočení změněna stránka menu, která se zatím ale na displeji neukazuje. Stránky menu se řídí podle stavového diagramu, který bude popsán dále. Detekce otočení enkodéru je řešena pomocí externího přerušení, kdy na sestupnou hranu jednoho výstupu enkodéru je vyvoláno přerušení a je čten stav na druhém výstupu enkodéru, podle kterého je rozhodnuto o směru. V této rutině přerušení je také nastaven příznak, kterým se detekuje otočení enkodéru za poslední sekundu, a toto přerušení je dočasně zakázáno. Přerušení jsou pak obnovena po provedení aktuálního stavu menu.



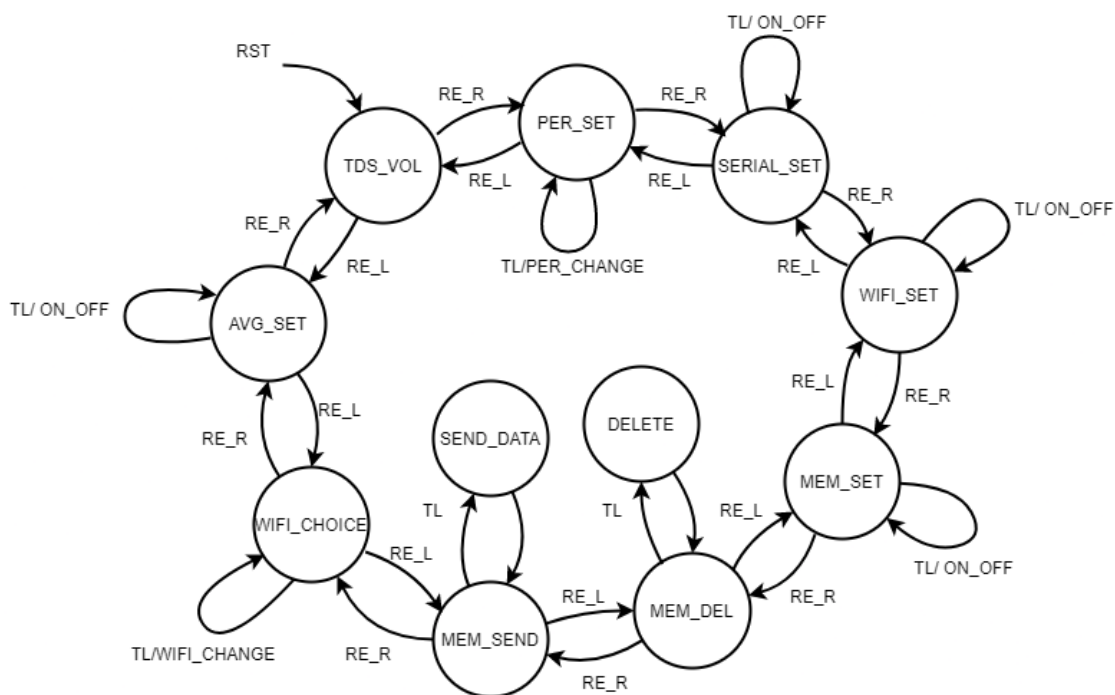
Obr. 16 Vývojový diagram programu pro ESP32

V dalších dvou blocích programu je měřeno výstupní napětí senzorů a je uloženo spolu s aktuálním časem běhu programu do bufferů. Takto uložené hodnoty jsou důležité pro posílání napětí anebo ukládání napětí a času. Následuje blok, ve kterém je dotazováno, jestli neuběhla perioda průměrování napětí. Tato perioda je dána pevně. Pokud tato perioda uběhla, je uložen mezisoučet napětí a je inkrementován počet, kolikrát byl mezisoučet proveden. Pokud je pak požadavek na posílání nebo ukládání

průměrných napětí v dané periodě, ve které se data posílají nebo ukládají, je tímto počtem mezisoučtů vydělena aktuální hodnota nasčítaných hodnot napětí. Pokud tato perioda neuplynula, program pokračuje na další blok. Průměrování je zapnuto neustále, aby během periody, ve které se data posílají, nemohlo dojít k tomu, aby bylo naměřených vzorků méně. Potom je jenom na uživateli, jestli se bude posílat nebo ukládat aktuální naměřené napětí, nebo průměr za poslední uběhnutou periodu.

V následujícím bloku je dotazováno, jestli neuplynula perioda, po které se mají posílat anebo ukládat naměřená data. Pokud ne, pokračuje se na další blok. Pokud ano, je dotázáno, jestli se mají posílat průměry napětí za poslední periodu, nebo nikoliv. Dle nastavení se tedy posílá průměr nebo aktuální hodnota. Nastavení také zahrnuje, zda se data posílají pomocí USB, Wi-Fi anebo se data ukládají do paměti Flash. Tato konfigurace je libovolná, tedy nemusí se data posílat a ukládat vůbec, nebo se mohou posílat i pomocí USB, bezdrátově a současně se mohou ukládat. Poté je vynulován počet mezisoučtů pro průměr a průměrná napětí.

Následuje blok, ve kterém je prováděn aktuální stav menu. Každý stav reprezentuje jednu stránku, ve které je buď zobrazováno napětí senzorů na displeji, nebo je na displej vypsána část celkového nastavení zařízení a tlačítkem enkodéru je prováděna změna tohoto nastavení. Tento stavový diagram, který reprezentuje funkci menu, je na obr. 17.



Obr. 17 Stavový diagram funkce menu


Přechody označené jako RE_R a RE_L znamenají otočení enkodéru doprava a doleva. Při otočení doprava se tak změní stav menu a při následném otočení doleva se vrátí na původní stav. Přechod označený TL značí stisk tlačítka. Stavy budou popisovány podle směru hodinových ručiček dle obrázku. Po restartu zařízení je prováděn stav TDS_VOL, ve kterém jsou zobrazována aktuální naměřená výstupní napětí senzorů. Následující stav je označen jako PER_SET. V tomto stavu je

zobrazována aktuální perioda, po které se mají data ukládat a posílat. Při stisku tlačítka je tato perioda změněna, což odpovídá výstupu PER_CHANGE. Volba je nastavena na 1, 5, 15, 30 a 60 minut. Pokud je nastavena perioda 60 minut a je stisknuto tlačítko, nastaví se perioda opět na 1 minutu. Dalším stavem je SERIAL_SET. V tomto stavu je možné zakázat nebo povolit posílání dat pomocí USB. Nastavení je provedeno tlačítkem. Následuje stav WIFI_SET, ve kterém lze obdobně povolit, nebo zakázat bezdrátové posílání dat. Při povolení se zařízení pokusí připojit ke zvolené síti Wi-Fi. V případě úspěchu jsou data posílána bezdrátově, při neúspěchu je vypsána hláška selhání připojení a data se nemohou posílat. Při zákazu posílání dat přes Wi-Fi je zařízení odpojeno od zvolené sítě. Stav MEM_SET opět funguje obdobně. Pomocí tlačítka lze zakázat nebo povolit ukládání dat do paměti Flash. Následují dva stavy, které rovněž souvisí s pamětí Flash. Ve stavu označeném jako MEM_DEL lze vymazat celý uložený záznam. Toto se opět aktivuje stiskem tlačítka. Ve stavu s označením MEM_SEND lze stiskem tlačítka poslat celý uložený záznam přes sběrnici USB. Následuje stav WIFI_CHOICE, ve kterém lze pomocí tlačítka vybrat jednu z Wi-Fi sítí, které jsou uloženy v programu. Po této volbě se ve stavu WIFI_SET zařízení připojí právě ke zvolené síti. Poslední stav je označen jako AVG_SET, ve kterém se pomocí tlačítka volí, zda se budou posílat průměrná napětí, nebo nikoliv.

4.2 Sběr dat

Při experimentech bylo nutné zajistit sběr dat ze zařízení. Z naměřených dat by pak mělo být možné vykreslovat závislosti výstupních napětí senzorů v čase, aby tak mohly být monitorovány kvasné procesy během experimentálních měření. Tyto grafické závislosti je pak možné porovnávat a podle toho upravovat další experimenty.

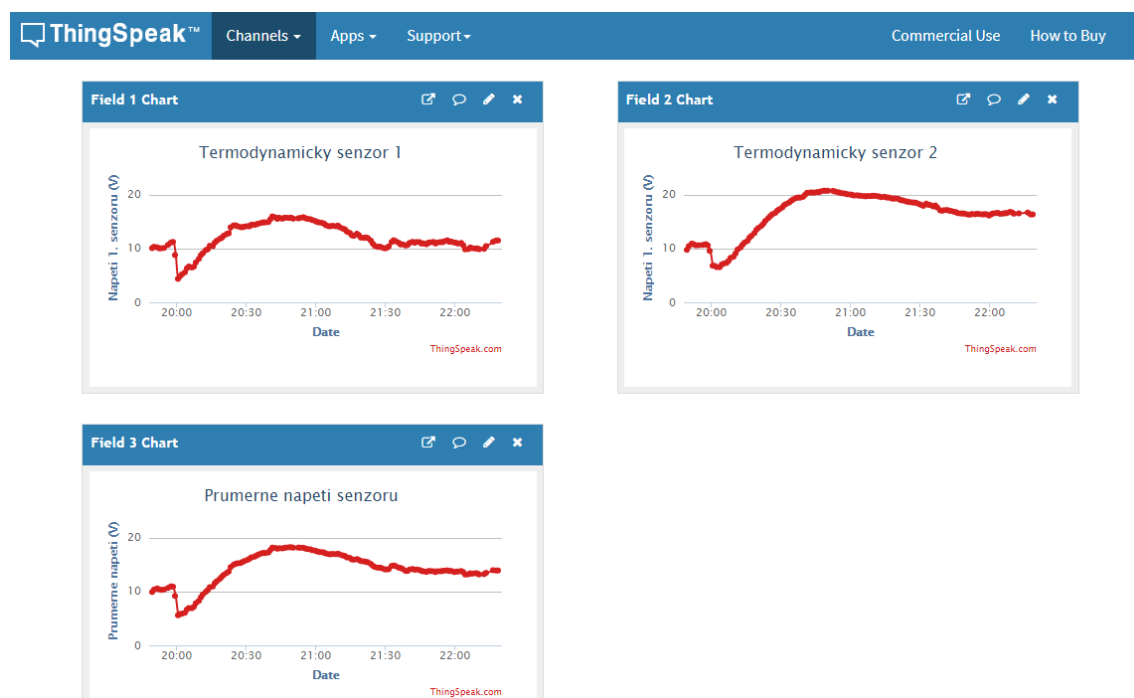
Pro sběr dat, která jsou posílána zařízením přes sběrnici USB, byl zvolen program PLX-DAQ [27], který je softwarovým doplňkem tabulkového procesoru Microsoft Excel. Na obr. 18 lze vidět vzhled programu, kdy byla testována jeho funkčnost.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Time	Timer	Data 1	Data 2	<div> <div>Data Acquisition for Excel</div> <div>  <div> Control <input type="checkbox"/> Download Data <input type="checkbox"/> Clear Stored Data <input type="checkbox"/> User1 <input type="checkbox"/> User2 <input type="button" value="Reset Timer"/> <input type="button" value="Clear Columns"/> </div> </div> <div> Settings Port: <input type="text" value="11"/> Baud: <input type="text" value="9600"/> <input type="button" value="Connect"/> <input checked="" type="checkbox"/> Reset on Connect <div> <input type="button" value="C"/> <input type="button" value="R"/> <input type="button" value="T"/> </div> </div> <div> Controller Messages <div>Disconnected</div> </div> </div>			
2	11:38:45	41925,20	17,85	12,85				
3	11:38:46	41926,19	17,72	12,72				
4	11:38:47	41927,19	18,24	13,24				
5	11:38:48	41928,19	17,98	12,98				
6	11:39:01	41941,22	18,24	13,24				
7	11:39:01	41941,26	17,72	12,72				
8	11:39:01	41941,27	17,72	12,72				
9	11:39:01	41941,29	17,98	12,98				
10	11:39:01	41941,30	17,85	12,85				
11	11:39:01	41941,32	18,24	13,24				
12	11:39:01	41941,33	18,11	13,11				
13	11:39:01	41941,34	18,24	13,24				
14	11:39:01	41941,36	18,24	13,24				
15	11:39:01	41941,38	18,24	13,24				
16	11:39:01	41941,39	18,11	13,11				
17	11:39:01	41941,41	18,24	13,24				
18	11:39:02	41942,19	18,24	13,24				
19	11:39:03	41943,19	18,24	13,24				

Obr. 18 Vzhled programu PLX-DAQ při testu

Program PLX-DAQ je schopen přijímat data z libovolného USB portu počítače a ukládat je do sloupců v programu Excel. Při příjmu dat je automaticky do jednoho ze sloupců uložen i aktuální čas a není tak potřeba posílat aktuální čas běhu programu. Při ukládání dat do paměti Flash je ukládán i aktuální čas běhu programu, ten je pak při odesílání naměřeného záznamu posílán spolu s naměřenými daty.

K bezdrátovému odesílání naměřených dat existuje řada cloudových služeb. Pro testování zařízení byla vybrána open source služba ThingSpeak [28], která umožňuje pomocí protokolu HTTP (Hypertext transfer protocol) přijímat a odesílat data například z modulu ESP32. Na stránkách ThingSpeak je nejprve nutné se bezplatně zaregistrovat. Na založeném účtu lze pak vytvořit vlastní kanál, na který budou zasílána naměřená data. Tento kanál má své unikátní identifikační číslo a API klíč (Application programming interface) pro zápis. Modul ESP32 se prostřednictvím bezdrátové sítě Wi-Fi připojí k serveru ThingSpeak a zašle na tento server řetězec, který obsahuje naměřená data, unikátní identifikační číslo kanálu a API klíč. Odeslaná data lze zobrazit přímo na internetových stránkách ThingSpeak v podobě grafů. Naměřená data lze ze stránek následně exportovat a zpracovat například v programu Microsoft Excel. Na obr. 19 lze vidět vzhled grafů ThingSpeak, které byly vytvořeny během jednoho z experimentálních měření.



Obr. 19 Vzhled grafů ThingSpeak během experimentu

5 TESTOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ

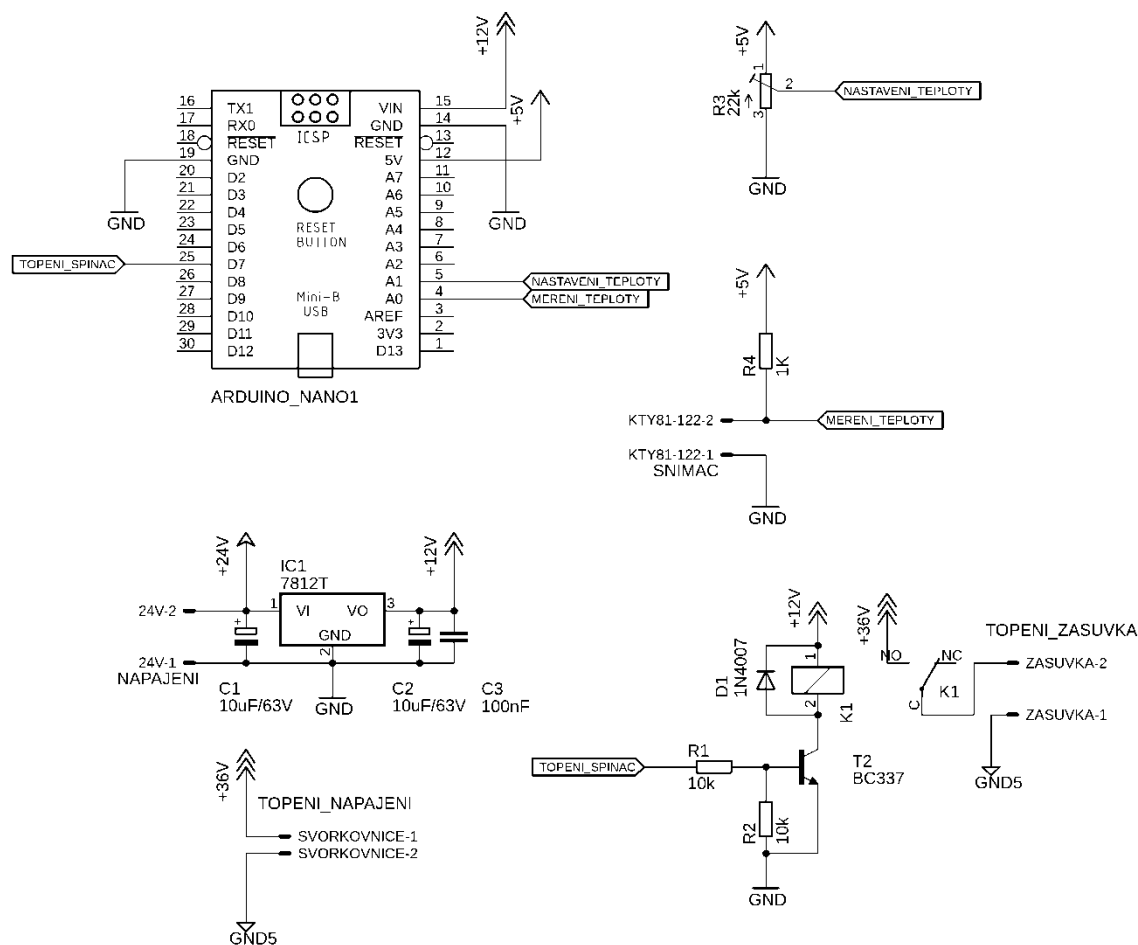
Byla provedena řada experimentálních měření, při kterých byly se zařízením monitorovány kvasné procesy. Při těchto měření bylo nutné dodržet vhodné a kontrolované podmínky pro kvasný proces, především tedy zvýšenou teplotu. Pro tyto účely byl sestaven jednoduchý regulátor teploty. Část experimentů byla inspirována měřeními, které byly publikovány v [6]. V této kapitole budou popsány jednotlivé experimenty a krátký popis regulátoru teploty.

5.1 Regulátor teploty

Pro účely experimentů v domácích podmínkách byl sestaven jednoduchý regulátor teploty pro topnou spirálu. Topná spirála je určena pro napájení z distribuční sítě. Experimentálně bylo však zjištěno, že pro dosažení požadovaných teplot 30 až 40 °C stačí napájení z laboratorního zdroje, jehož maximální výstupní napětí je 36 V. Bylo tedy rozhodnuto napájet spirálu z tohoto zdroje.

Celé zapojení regulátoru je na obr. 19. Jádrem zapojení je modul Arduino Nano, který je osazen mikrokontrolérem ATmega328P [29]. Tento mikrokontrolér má zabudovaný A/D převodník, ke kterému lze připojit celkem 8 vstupů mikrokontroléru. K jednomu z těchto vstupů je připojen výstup odporového děliče, který tvoří rezistor R4 a teplotní snímač KTY81-122, který slouží k měření teploty. K dalšímu takovému vstupu je připojen potenciometr R3, který je zapojený také jako dělič napětí. Tento potenciometr slouží k nastavení požadované teploty. Akční člen regulátoru je relé K1, které při sepnutí přivádí napětí z laboratorního zdroje na topnou spirálu. Relé je spínáno tranzistorem T2, který je zapojený jako spínač. Do báze tranzistoru je tak přiváděn malý proud přes rezistor R1 přímo z výstupu mikrokontroléru. Rezistor R2 zajistí, aby nebyl tranzistor sepnut v případě, kdy by byl výstup mikrokontroléru ve stavu vysoké impedance. Při rozepnutí tranzistoru přebírá proud cívky dioda D1 a chrání tak tranzistor před zničením vlivem vzniku napěťové špičky. Vybrané relé má být spínáno napětím 12 V. K tomu slouží napěťový regulátor LM7812T, který napájí i modul Arduino Nano. Mikrokontrolér je pak napájen zdrojem 5 V, který je osazený na modulu Arduino. K napěťovému regulátoru byly přidány ještě filtrační kondenzátory C1, C2 a C3. Celé zapojení je napájeno z externího laboratorního zdroje s výstupním napětím 24 V. Tím pádem je jedním zdrojem napájen regulátor i navrhované zařízení. Při experimentech tedy byly použity dva laboratorní zdroje.

V intervalech po jedné sekundě je měřena aktuální teplota. Ta se porovná s požadovanou teplotou. Pokud je teplota menší než požadovaná, je sepnuto relé. Pokud je teplota aspoň o jeden stupeň Celsia vyšší než požadovaná, je relé rozepnuto. Aktuální a požadovaná teplota jsou ve stejném intervalu posílána přes sběrnici UART do převodníku UART/USB, který je součástí modulu Arduino Nano a následně pomocí USB do počítače, kde je možné teplotu zobrazit pomocí komunikačního terminálu. Program pro mikrokontrolér ATmega328P byl napsán v jazyce C v prostředí Atmel Studio 7.0.



Obr. 20 Zapojení regulátoru teploty

5.2 Experimentální měření

Jelikož byla část experimentů inspirována publikací [6], byla snaha docílit podobných výsledků měření. Vždy byl monitorován roztok cukru, do kterého bylo přidáno určité množství pekařského droždí. Při měření bylo nejdůležitější nalézt vhodnou konfiguraci teplotních snímačů termodynamických senzorů. Jeden termodynamický senzor obsahuje dvojici teplotních snímačů. Osvědčily se celkem dvě konfigurace, přičemž v obou případech bylo nutné opatřit snímače ochranou proti vlhkosti. Bylo tedy nutné pouzdro snímačů opatřit vhodnou ochranou a otestovat její vodotěsnost. Ta byla testována ponorem snímačů do vody za současného měření jejich odporu. Osvědčilo se potáhnout jednotlivé vývody snímačů smršťovací bužírkou a následně i celé pouzdro snímačů smršťovací bužírkou.

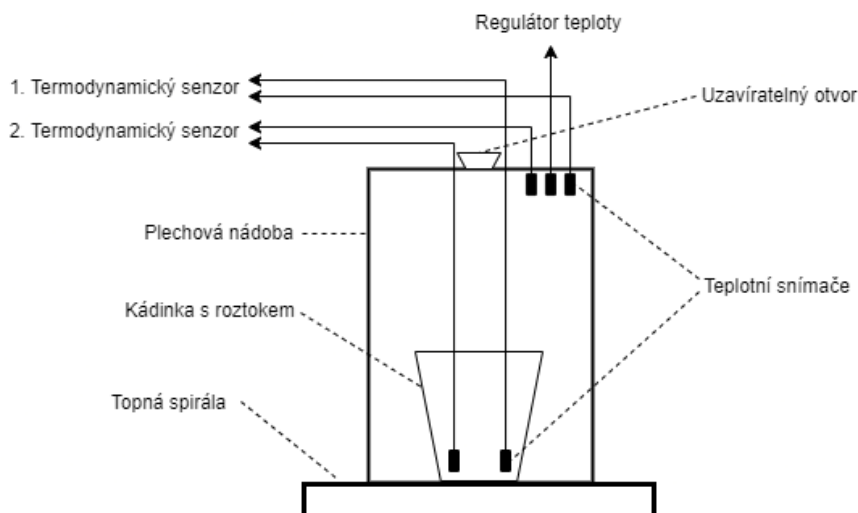
Veškerá měření byla provedena v domácích podmínkách na provizorním pracovišti. Na obr. 21 lze vidět fotografii pracoviště před provedením jednoho z experimentů.



Obr. 21 Fotografie provizorního pracoviště

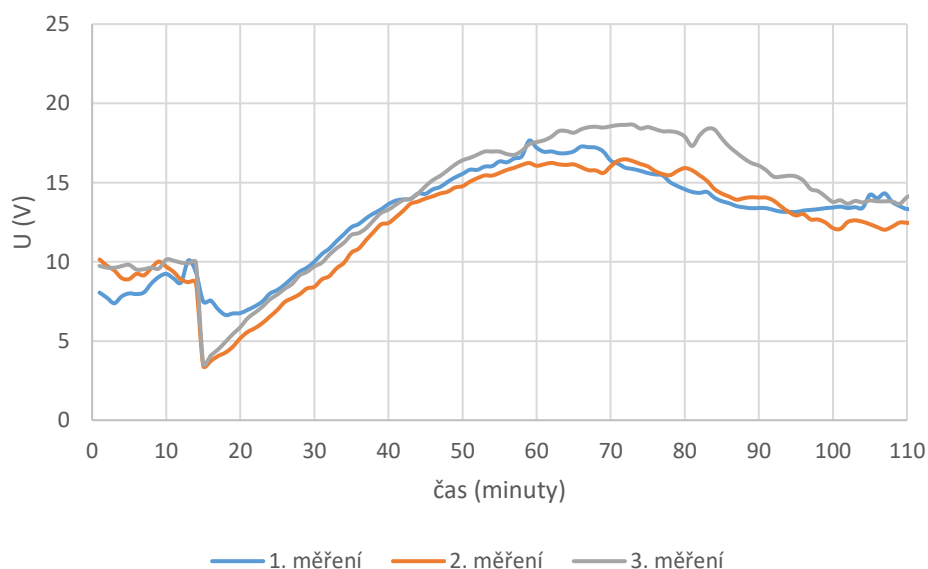
5.2.1 Testování první konfigurace snímačů

Při experimentech se osvědčila konfigurace snímačů, při které byla kádinka s roztokem cukru vložena na dno plechové nádoby, která byla položena na topné spirále. Ve víku nádoby byly vytvořeny otvory pro teplotní snímače. V rámci jednoho termodynamického senzoru byl vždy jeden snímač ponořen do roztoku a druhý byl umístěn zevnitř nádoby na víku. Na víku byl v blízkosti těchto snímačů umístěn i snímač teploty pro regulátor teploty topné spirály. Ve víku byl vytvořen ještě uzavíratelný otvor, kterým se do roztoku cukru přidala dávka pekařského droždí. Konfigurace je schematicky naznačena na obr. 22.

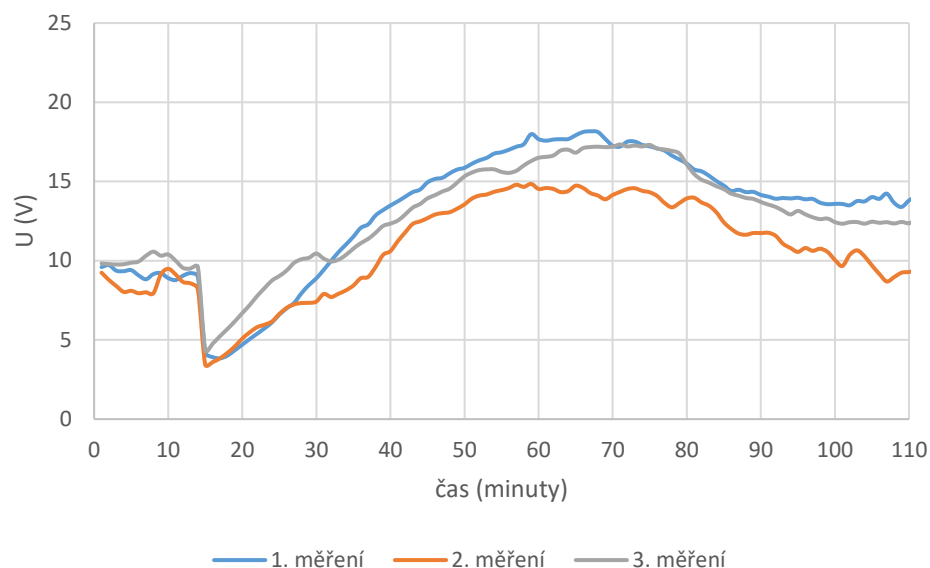


Obr. 22 Konfigurace teplotních snímačů s plechovou nádobou

Nejdříve byla ověřována funkčnost této konfigurace při třech po sobě jdoucích shodných měřeních. Při těchto měřeních byly do zpětných vazeb termodynamických senzorů zapojeny rezistory o hodnotě 2,2 k Ω . V kádince se 40 ml vody bylo rozpuštěno 30 g cukru. Vnitřek nádoby byl vyhřán na 35 °C a výstupní napětí senzorů bylo nastaveno přibližně na 10 V. Následně bylo 15 minut sledováno, jestli výstupní napětí senzorů výrazně nekolísá a je ustálené na přibližně stejné hodnotě. Poté byly do roztoku přidány 2 g pekařského droždí, které bylo rozmícháno v 5 ml vody. Měřená data byla posílána bezdrátově s periodou 1 minuta, přičemž nebylo zapnuto průměrování. Při všech měřeních bylo dosaženo obdobných výsledků. Výsledné závislosti výstupních napětí senzorů v čase jsou v grafech na obr. 23 a 24.



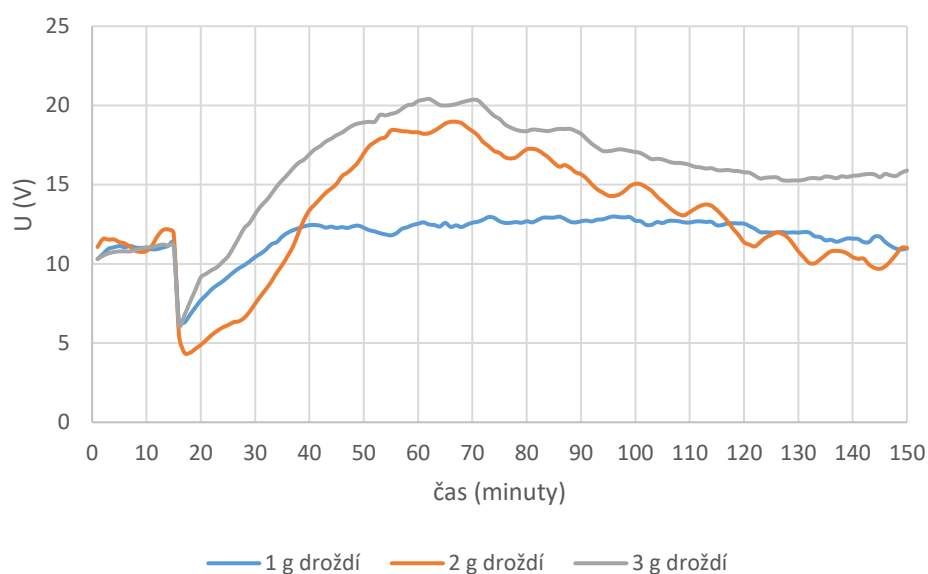
Obr. 23 Závislost výstupního napětí 1. senzoru na čase během kvasného procesu



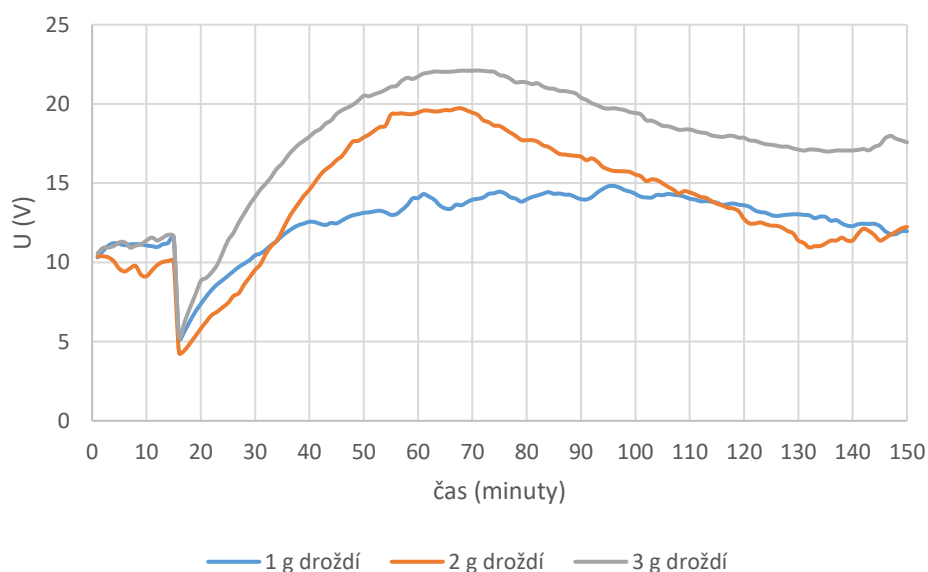
Obr. 24 Závislost výstupního napětí 2. senzoru na čase během kvasného procesu

Na průběhu lze vidět pokles napětí v čase 15 minut. Ten je způsoben právě přidáním droždí do roztoku, čímž se roztok krátce ochladil. Následuje nárůst napětí vlivem probíhajícího kvasného procesu. Po ukončení kvasného procesu výstupní napětí opět poklesne a má tendenci se ustálit na nové hodnotě.

S touto konfigurací byl proveden experiment, který byl inspirován měřením, které lze nalézt v publikaci [6]. Při tomto měření byl zkoumán vliv množství droždí při konstantním množství cukru na výsledný průběh výstupních napětí. V kádince se 40 ml vody bylo tentokrát rozpuštěno 20 g cukru a postupně během tří měření bylo přidáváno různé množství droždí. Výsledek lze vidět v grafech na obr. 25 a 26. Při množství droždí 1 g bylo během kvasného procesu nejméně tepla, čemuž odpovídá i výsledný průběh, na kterém není příliš patrný vzrůst výstupního napětí během kvasného procesu. Při vyšším množství droždí je nárůst výstupních napětí během kvasného procesu velice dobře vidět. Na konci je opět vidět tendence ustálení výstupního napětí. Tímto bylo dosaženo obdobných výsledků měření jako v publikaci [6].



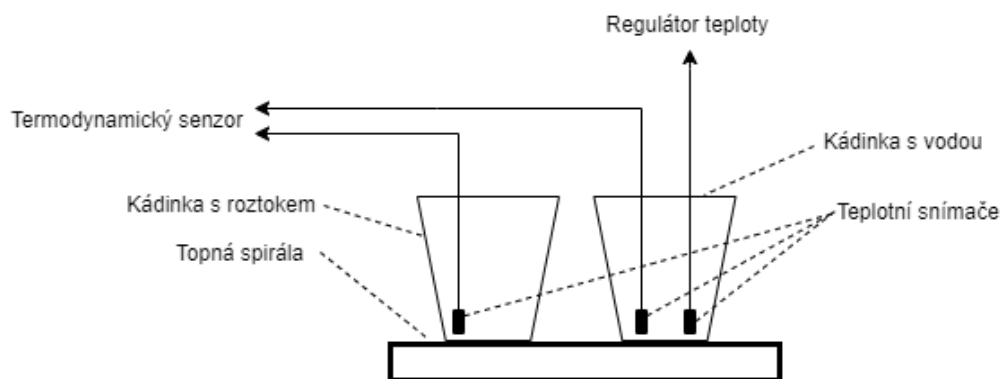
Obr. 25 Vliv množství droždí na výsledný průběh výstupního napětí 1. senzoru



Obr. 26 Vliv množství droždí na výsledný průběh výstupního napětí 2. senzoru

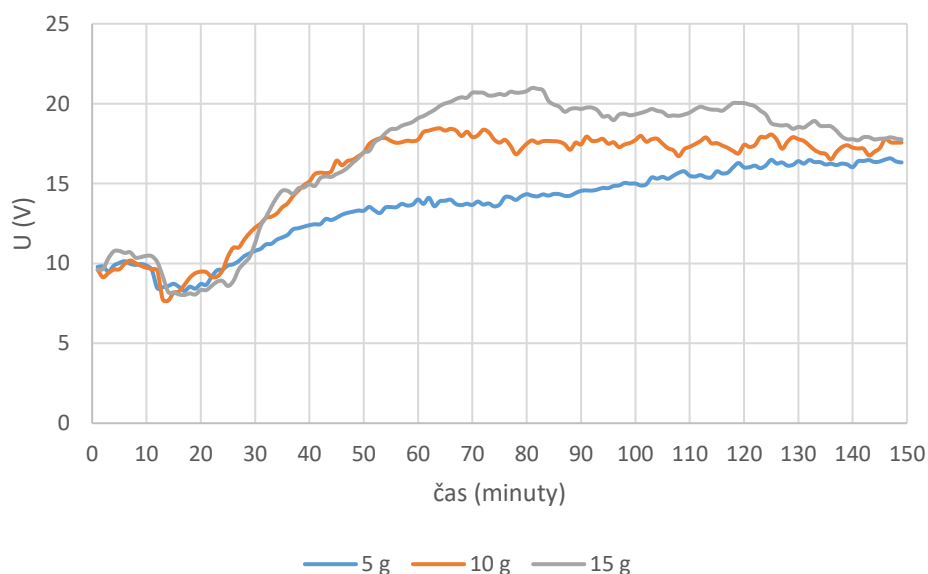
5.2.2 Testování druhé konfigurace snímačů

Druhá osvědčená konfigurace je schematicky znázorněna na obr. 27. Tato konfigurace teplotních snímačů zahrnovala dvě kádinky, které byly položeny na topné spirále. Kvůli rovnoměrnějšímu přenosu tepla bylo ještě mezi kádinky a topnou spirálou přidáno několik vrstev hliníkové fólie. V jedné kádince byl roztok cukru a ve druhé pouze voda. V rámci jednoho termodynamického senzoru byl vždy jeden teplotní snímač ponořen do roztoku cukru a druhý do kádinky. Jedná se o shodnou konfiguraci, která byla použita v [6].



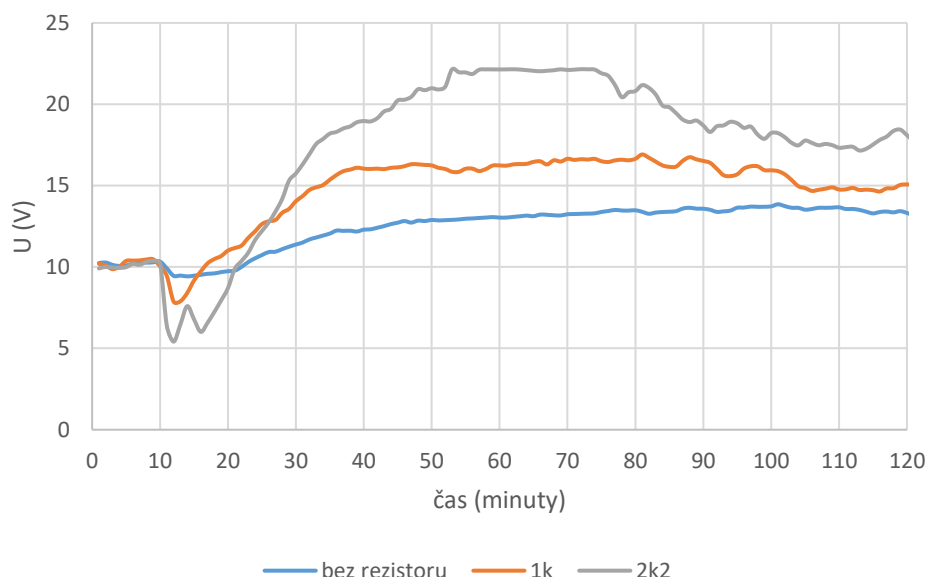
Obr. 27 Konfigurace teplotních snímačů se dvěma kádinkami

V kádince s vodou byl vložen také snímač teploty pro regulátor teploty. Teplota v této kádince byla udržována na 35 °C. S touto konfigurací byl proveden experiment, který byl rovněž inspirován publikací [6]. Při tomto měření byl měřen vliv množství cukru při stejném množství droždí na výsledný průběh výstupních napětí senzorů. V jedné kádince bylo v 30 ml vody rozpuštěno určité množství cukru, konkrétně 5 g, 10 g a při posledním měření 15 g. Do druhé kádinky bylo přidáno takové množství vody, aby byla hladina v obou kádinkách shodná. Po nastavení a ustálení výstupních napětí senzorů byl přidán 1 g droždí, které bylo opět rozmícháno v 5 ml vody. Toto měření bylo provedeno pouze s jedním ze dvou termodynamických senzorů, protože došlo k poškození ochrany proti vlhkosti u jednoho z dvojice teplotních snímačů druhého termodynamického senzoru. Tentokrát byla do zpětné vazby senzoru dána paralelní kombinace rezistorů 5,6 k Ω a 2,2 k Ω , což odpovídá hodnotě přibližně 1,57 k Ω . Výsledná závislost výstupního napětí senzoru v čase je na obr. 28. V grafu lze vidět, že s rostoucím množstvím cukru je patrný větší nárůst výstupního napětí senzoru. Výsledek měření je srovnatelný s měřením z publikace [6].



Obr. 28 Vliv množství cukru na výsledný průběh výstupního napětí senzoru

Vzhledem k tomu, že vyrobený prototyp umožňuje volbu citlivosti senzorů volbou hodnoty rezistoru ve zpětné vazbě senzorů, byla provedena tři měření, při kterých byla postupně volena jiná hodnota zpětnovazebního rezistoru. Při tomto měření bylo vždy v jedné kádince rozpuštěno 10 g cukru a byl přidáván 1 g droždí. Při prvním měření byl zpětnovazební odpor nahrazen zkratem, při druhém byl zařazen rezistor s hodnotou 1 k Ω a při posledním měření rezistor s hodnotou 2,2 k Ω . Při měřeních byl opět použit pouze jeden ze dvou termodynamických senzorů. Výsledné grafické závislosti jsou na obr. 29. Z grafu je patrné, že při nahrazení zpětnovazebního rezistoru zkratem není vzrůst napětí během kvasného procesu příliš dobře patrný. Při zařazení rezistoru s hodnotou 1 k Ω do zpětné vazby byl vzrůst napětí dobře pozorovatelný. Pokud byl zařazen do zpětné vazby rezistor o hodnotě 2,2 k Ω , dostal se při této konfiguraci snímačů operační zesilovač i do oblasti saturace. Z tohoto důvodu nebyl proveden test se zbývajícím hodnotou odporu 5,6 k Ω .



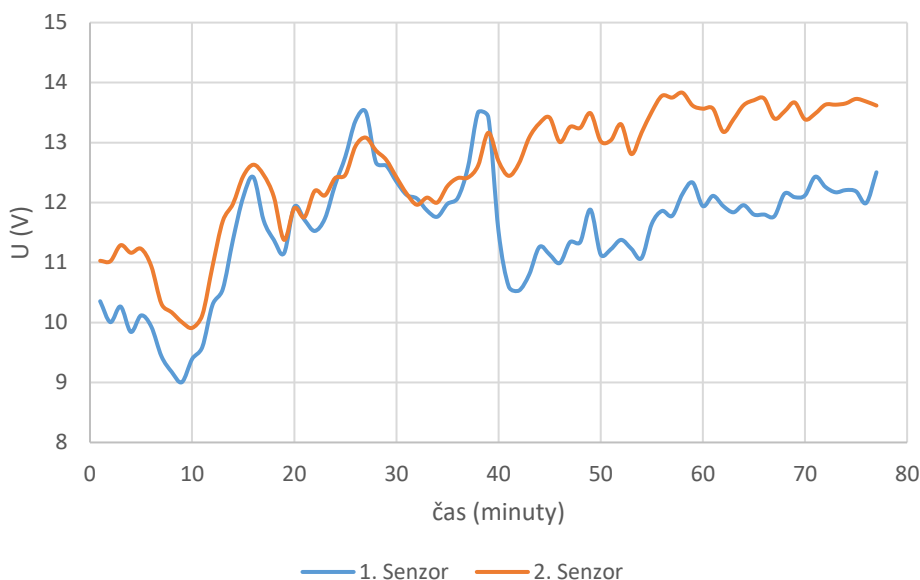
Obr. 29 Vliv velikosti odporu ve zpětné vazbě termodynamického senzoru

5.2.3 Některé příklady nevhodných konfigurací snímačů

Byla provedena řada experimentů, při kterých se ukázala být konfigurace teplotních snímačů nevhodná. To se projevilo na výsledných závislostech výstupních napětí. Výsledky pak neodpovídaly předpokladům nejspíše z důvodů, že měření bylo velice ovlivněno okolním prostředím nebo například samotným regulátorem teploty topné spirály.

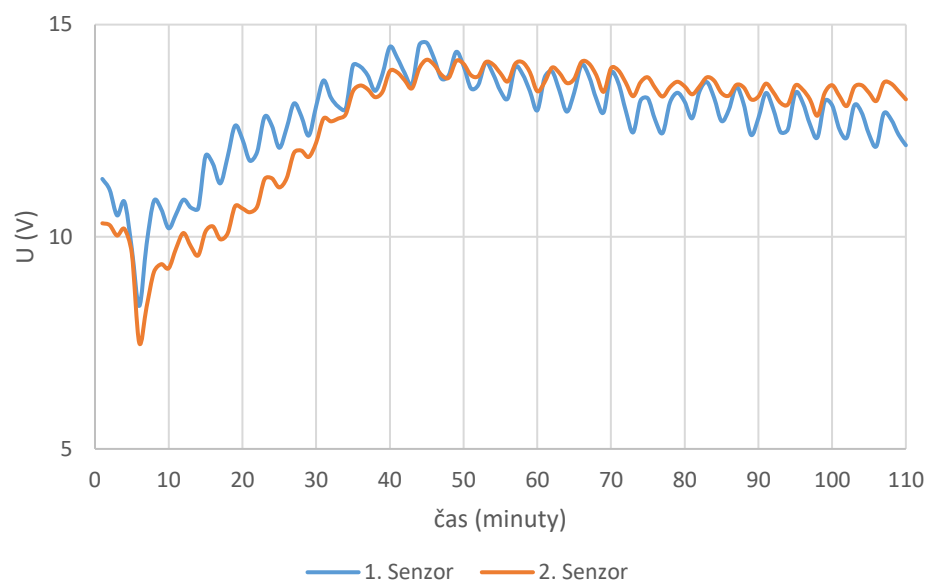
Jako příklad, při kterém došlo k výraznému ovlivnění výsledků, lze uvést takové uspořádání, kde byl v rámci termodynamického senzoru jeden snímač ponořen do roztoku a druhý byl přidělán v horní části kádinky. Kádinka byla položena na topnou spirálu, přičemž teplotní snímač pro regulátor teploty byl přidělán přímo na topné spirále, přičemž byla udržována její teplota na 40 °C. Ve zpětných vazbách senzorů byly zapojeny rezistory o hodnotě 2,2 k Ω . V kádince bylo rozpuštěno 30 g

cukru ve 40 ml vody. Následně byly přidány 2 g pekařského droždí rozmíchaného v 5 ml vody. Výsledek měření lze vidět na obr. 30. Na začátku lze pouze vidět pokles výstupních napětí, které bylo způsobeno přidáním droždí do roztoku, a následně i nárůst napětí. Celý průběh však vůbec neodpovídal předpokladům. To bylo způsobeno nejspíše změnami teploty v okolí kádinky. Ty mohly být senzory zaznamenány, protože jeden pár snímačů nebyl buď udržován v prostředí s neměnnou teplotou, nebo nebyl například ponořen do vody, jako tomu bylo v předchozích konfiguracích.



Obr. 30 Výsledek měření při nevhodné konfiguraci snímačů, vliv okolních podmínek

Na obr. 31. lze vidět výsledek měření, při kterém došlo k ovlivnění výsledků vlivem regulátoru teploty topné spirály. Tentokrát byly použity dvě dvojice polypropylénových kelímků. Kelímek s připraveným roztokem 30 g cukru ve 40 ml vody byl vložen do dalšího kelímku stejné velikosti. Mezi nimi byl v úrovni hladiny roztoku fixován pár teplotních snímačů. Obdobně byl připraven druhý pár kelímků, přičemž ve vnitřním kelímku byla pouze voda. Množství cukru a vody bylo shodné s předchozím pokusem. Rezistory ve zpětných vazbách senzorů měly hodnotu 2,2 k Ω . Teplotní snímač regulátoru byl připevněn na topné spirále. Výsledný graf již připomíná požadovaný výsledek, avšak křivky jsou zvlněné vlivem regulace teploty.



Obr. 31 Výsledek měření při nevhodné konfiguraci snímačů, vliv regulace teploty

6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo nastudování metod monitorování kvasných procesů v potravinářském průmyslu, nastudování principu termodynamických senzorů a možnost jejich uplatnění právě při monitorování a charakterizaci kvasných procesů. Následně měl být popsán mikrokontrolér ESP32 firmy Espressif a možnosti programování tohoto mikrokontroléru. Dále měl být proveden návrh a realizace prototypu zařízení, které má sloužit k monitorování kvasných procesů, přičemž má být řízeno mikrokontrolérem ESP32 a jeho měřicí část má být tvořena termodynamickými senzory. S tímto prototypem měla být provedena experimentální měření, při kterých měla být ověřena funkčnost tohoto prototypu.

První dvě kapitoly práce tvoří teoretický rozbor. První kapitola zabývá stručným popisem kvasných procesů, které jsou využívány v potravinářství a metodami jejich monitorování. Většina popisovaných metod staví na analytických chemických metodách. Dále je zde možnost použití chemických senzorů a biosenzorů. Následně je zde uvedena možnost použití termodynamických senzorů při monitorování kvasných procesů včetně principu tohoto typu senzorů. Následně je popsána skupina vlivů, které na termodynamický senzor působí v reálných podmínkách. V další kapitole je stručně popsán mikrokontrolér ESP32, možnosti programování tohoto mikrokontroléru a modul ESP32-WROOM-32, který tento byl zvolen pro realizaci prototypu.

Následující dvě kapitoly práce se věnují kompletnímu návrhu zařízení. Třetí kapitola popisuje návrh zapojení prototypu. Nejdříve je uvedeno blokové zapojení celého prototypu, za kterým následuje popis zapojení jednotlivých bloků. Prvním popisovaným blokem je samotný modul ESP32, ke kterému je připojeno resetovací tlačítko, ke vstupům interního 12bitového A/D převodníku jsou připojeny výstupy termodynamických senzorů a dále je k modulu ESP32 připojen rotační enkodér, expandér ze sběrnice z I²C na paralelní sběrnici, který se stará o obsluhu displeje, a převodník UART/USB. Prototyp obsahuje dvojici termodynamických senzorů, které mají možnost volby citlivosti, která se provádí změnou odporu ve zpětných vazbách senzorů pomocí zkratovacích propojek na kolíkové liště. Uživatelské rozhraní tvoří dvouřádkový alfanumerický displej a rotační enkodér. Převodník UART/USB je nutný pro programování mikrokontroléru a pro zasílání dat pomocí sběrnice USB do osobního počítače. Celý prototyp je napájen z externího zdroje 24 V, který přímo napájí termodynamické senzory. Na prototypu je pak dvojice napájecích zdrojů. První z nich je spínaný snižující měnič z úrovně 24 V na 5 V, který se stará o napájení displeje a jeho expandéru ze sběrnice I²C na paralelní sběrnici. Dále obsahuje lineární napěťový regulátor s výstupním napětím 3,3 V pro napájení modulu ESP32. Vstupem toho zdroje je napěťová úroveň 5 V ze spínaného zdroje. Prototyp byl realizován na oboustranné desce plošného spoje. Ve čtvrté kapitole je popsán testovací obslužný program pro ESP32 pomocí vývojových diagramů a stavového automatu menu. Při jednotlivých stavech je zobrazen určitý údaj na displeji a pomocí rotačního enkodéru je možné nastavit chování prototypu. Výjimku tvoří první stav, ve kterém jsou pouze zobrazovány naměřená napětí termodynamických senzorů, která jsou měřena v periodě jedné sekundy. V dalších stavech je možné nastavit, jakým způsobem bude zacházeno s naměřenými daty. První možností je bezdrátové zasílání dat na cloudovou službu

ThingSpeak, ve které jsou z dat vykreslovány grafické závislosti a je možný jejich následný export. Další možností je posílání dat přes sběrnici USB do prostředí MS Excel. Případně je možné data ukládat do paměti Flash modulu ESP32 a následně tato data naráz přenést pomocí USB opět do prostředí Excel. Naměřená data lze také následně z paměti vymazat. Další nastavení zahrnuje volbu Wi-Fi sítě, průměrování napětí a volbu periody zasílání dat.

Poslední kapitola je věnována experimentálním měřením, při kterých byla ověřována funkčnost celého prototypu. Experimenty byly inspirovány publikací [6] a byla tedy snaha dosáhnout obdobných výsledků měření. Samotný kvasný proces probíhal v kádince nebo jiné nádobě. Pro měření bylo důležité dodržet konstantní zvýšenou teplotu pro tuto nádobu, aby kvasný proces mohl probíhat. Za tímto účelem byl sestaven jednoduchý regulátor teploty pro topnou spirálu. Nejdůležitější bylo nalézt vhodnou konfiguraci teplotních snímačů na monitorované soustavě, aby bylo docíleno správných výsledků měření. Celkem se osvědčila dvojice konfigurací, která je v této kapitole popsána. S těmito konfiguracemi byla provedena řada experimentů, při kterých probíhal kvasný proces v roztoku cukru s vodou pomocí kvasinek. Výstupem experimentů jsou grafické závislosti výstupních napětí senzorů během kvasného procesu. Jako první byly provedeny tři po sobě jdoucí shodné experimenty, při kterých byla ověřována funkčnost konfigurace. Dále se jednalo o experimenty, při kterých byl zkoumán vliv množství cukru a množství kvasinek na výslednou křivku a vliv hodnoty rezistoru ve zpětné vazbě termodynamického senzoru. Na konci této kapitoly je také ukázka dvou experimentů, při kterých nebyla zvolena vhodná konfigurace teplotních snímačů. Při těchto experimentech nebylo dosaženo požadovaných výsledků vlivem okolních podmínek a regulace teploty.

Výstupem práce je tedy funkční prototyp zařízení, které je schopno monitorování kvasných procesů za pomoci dvojice termodynamických senzorů a dle nastavení je schopné zasílání naměřených dat do osobního počítače, na cloudovou službu ThingSpeak anebo data ukládat do paměti. Prototyp je v podobě osazené a oživené desky plošného spoje. Proto by mohl být následně umístěn do vhodné krabičky společně se síťovým napájecím zdrojem a umístěn v reálném systému. V reálné aplikaci by bylo stěžejní nalézt právě vhodnou konfiguraci teplotních snímačů pro každý termodynamický senzor a vhodně zvolit jejich citlivost. Výsledný prototyp lze teoreticky dále rozšiřovat po programové stránce i z hlediska zapojení. Jako příklad lze uvést rozšíření prototypu o další termodynamické senzory pro monitorování více soustav nebo například úpravu programu pro vzdálené nastavení zařízení.

LITERATURA

- [1] TANČINOVÁ, Dana, Jana MAKOVÁ, Soňa FELŠÖCIOVÁ, Miroslava KAČÁNIOVÁ a Vladimír KMEŤ. Mikrobiológia potravín. 2. uprav. vyd. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2008. ISBN 978-80-552-0145-0
- [2] ŠILHÁNKOVÁ, Ludmila. Mikrobiologie pro potravináře a biotechnology. Vydání 3. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-1024-6.
- [3] CABALLERO, Benjamin, Paul FINGLAS a Fidel TOLDRA, ed. Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition. 2. Academic Press, 2003. ISBN 978-0-12-227055-0.
- [4] KLOUDA, Pavel. Moderní analytické metody. 2., upr. a dopl. vyd. Ostrava: Pavel Klouda, 2003. ISBN 80-863-6907-2.
- [5] SHI, Jianguo, Derong FENG a Yiwei LI. Biosensors in Fermentation Applications. Fermentation Processes [online]. InTech, 2017, 2017-02-08 [cit. 2020-04-13]. DOI: 10.5772/65077. ISBN 978-953-51-2927-1. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/fermentation-processes/biosensors-in-fermentation-applications>
- [6] ADÁMEK, M., M. ŘEZNÍČEK a A. ADÁMKOVÁ. THE SIMPLE THERMODYNAMIC SENSORS FOR PROCESS MONITORING IN MILK PRODUCTION [online]. 2010 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://dSPACE5.zcu.cz/bitstream/11025/574/1/r4c3c1.pdf>
- [7] ADÁMEK, Martin a Michal ŘEZNÍČEK. MODERNÍ TECHNOLOGIE ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ A SYSTÉMŮ: LABORATORNÍ CVIČENÍ – Nekonenční aplikace technologie tlustých vrstev a jejich využití v senzorové technice (Termodynamické senzory) [online]. Brno: VUT FEKT [cit. 2020-03-25].
- [8] ŘEZNÍČEK, M. Termodynamické senzory na principu bilanční rovnováhy. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014. 93 stran, 5 příloh. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc. [cit. 2020-03-25]
- [9] ŘEZNÍČEK, M. Optimalizovaný termodynamický senzor na bilančním principu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc. [cit. 2020-03-25]
- [10] ESP32 je tu. Co přinese nástupce ESP8266? Root.cz [online]. poslední aktualizace 1.9.2016 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/esp32-je-tu-co-prinese-nastupce-esp8266/>
- [11] ESP32 Overview. Espressif.com [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp32/overview>
- [12] ESP32-WROOM-32. In: docs.espressif.com [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://dl.espressif.com/dl/schematics/pictures/esp32-wroom-32-front-back.jpg>
- [13] Espressif Systems: Datasheet ESP32-WROOM-32 [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
- [14] Espressif Systems: Datasheet ESP32: Hardware design guidelines [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_hardware_design_guidelines_en.pdf

- [15] Getting Started with the ESP32 Development Board. Randomnerdtutorials.com [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://randomnerdtutorials.com/getting-started-with-esp32/>
- [16] Espressif Systems: Datasheet ESP32: Technical Reference Manual [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf
- [17] Texas Instruments: Datasheet TL06xx Low-Power JFET-Input Operational Amplifiers [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl062.pdf?ts=1588077466435>
- [18] Elektronika, bastlení, návody: Použití rotačních enkodérů. Elektronika.kvalitne.cz [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <http://elektronika.kvalitne.cz/ATMEL/necoteorie/tutorial/RotaryEncoder/RotaryEncoder.html>
- [19] Sunplus Technology Co: Datasheet SPLC780D: 16COM/40SEG Controller/Driver [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: https://www.newhavendisplay.com/app_notes/SPLC780D.pdf
- [20] Midas Displays: Datasheet MC21605C6W-SPR-V2 2×16 5mm Character Height LCD Module [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://datasheet.octopart.com/MC21605C6W-SPR-V2-Midas-datasheet-68484112.pdf>
- [21] Texas Instruments: Datasheet PCF8574 Remote 8-Bit I/O Expander for I2C Bus [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574.pdf>
- [22] Bi-Directional MOSFET Voltage Level Converter 3.3V to 5V. hobbytronics.co.uk [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.hobbytronics.co.uk/mosfet-voltage-level-converter>
- [23] ESP-Prog Reference Design. Espressif.com [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/support/download/documents?keys=reference+design>
- [24] Texas Instruments: Datasheet LM1117 800-mA Low-Dropout Linear Regulator [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf>
- [25] Texas Instruments: Datasheet TPS5410 1-A, Wide Input Range, Step-Down Converter [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps5410.pdf>
- [26] WEBENCH® POWER DESIGNER. webench.ti.com [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://webench.ti.com/power-designer/>
- [27] Parallax: PLX-DAQ. Parallax Inc. Equip your genius [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>
- [28] ThingSpeak. ThingSpeak for IoT Projects [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://thingspeak.com/>
- [29] Microchip: Datasheet ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>

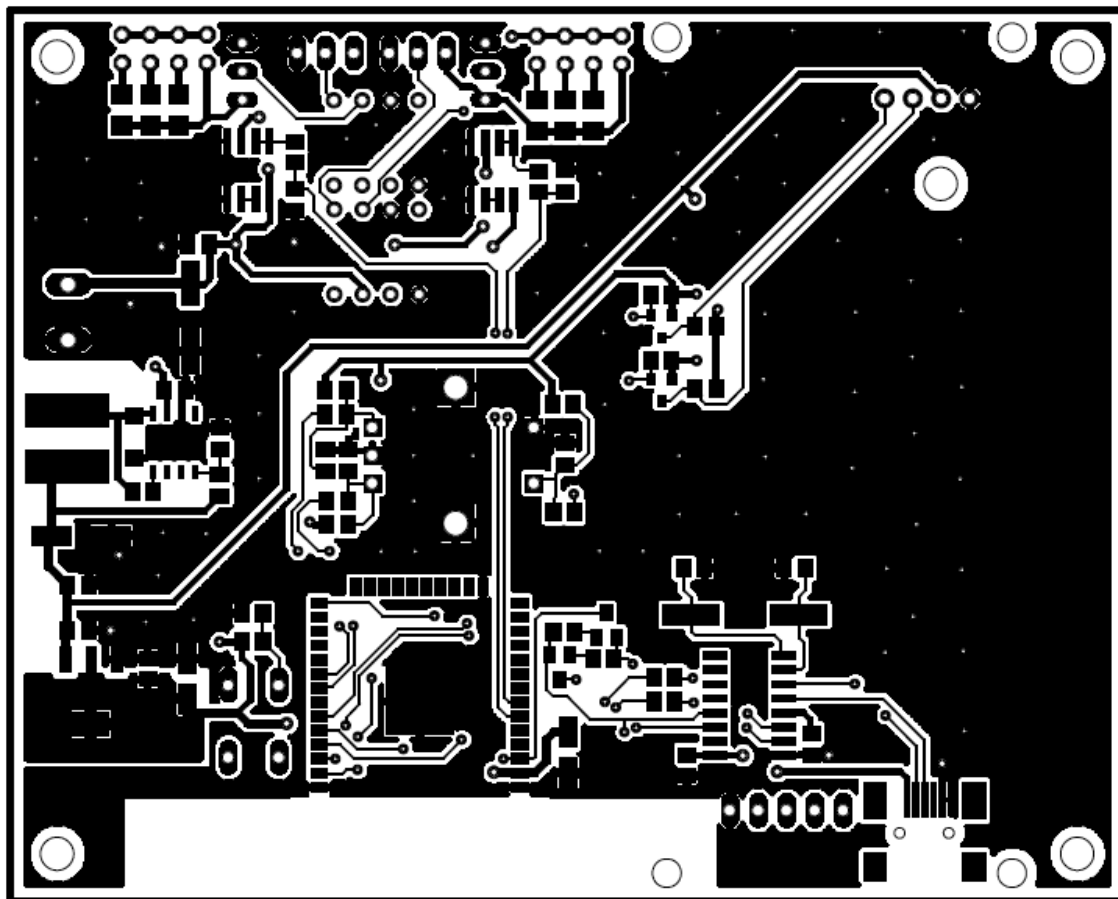
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

TDS	termodynamický senzor
TCR	Temperature Coefficient of Resistance [K^{-1}]
OZ	operační zesilovač
α	úhel natočení potenciometru [Ω]
P_t	teplotně závislý rezistor
A/D	Analogově/Digitální
D/A	Digitálně/Analogový
B	bajt
MIPS	Million Instructions Per Second
SRAM	Static Random Access Memory
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
I ² C	Inter-integrated Circuit
I ² S	Inter-integrated Circuit Sound
USB	Universal Serial Bus
LCD	Liquid Crystal Display
RTS	Request to send
DTR	Data terminal ready
RX	Received
TX	Transmitted
EN	Enable
HTTP	Hypertext transfer protocol
QFN	Quad Flat No leads package
SoC	System on Chip
API	Application programming interface

SEZNAM OBRÁZKŮ

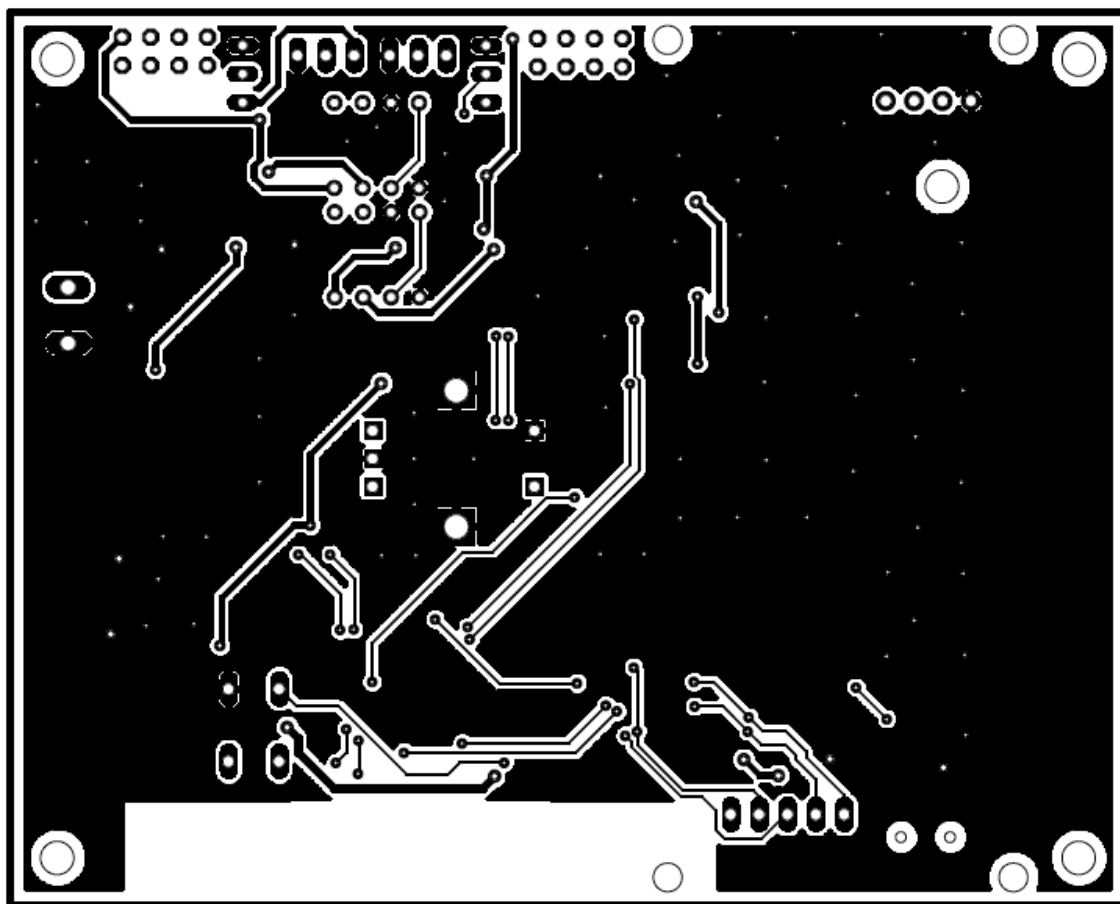
Obr. 1 Zapojení termodynamického senzoru 1. řádu podle [4]	5
Obr. 2 Zapojení termodynamického senzoru 2. řádu, podle [5]	6
Obr. 3 Upravené zapojení termodynamického senzoru 2. řádu.....	7
Obr. 4 Skupina vlivů působící na termodynamický senzor [5]	7
Obr. 5 Vzhled modulu ESP32-WROOM-32 [12]	8
Obr. 6 Vnitřní zapojení modulu ESP32-WROOM-32 [14].....	9
Obr. 7 Blokové schéma prototypu	10
Obr. 8 Zapojení modulu ESP32-WROOM-32	11
Obr. 9 Zapojení termodynamického senzoru.....	12
Obr. 10 Zapojení rotačního enkodéru a tlačítka	13
Obr. 11 Zapojení převodníků úrovně pro I ² C sběrnici expandéru.....	13
Obr. 12 Zapojení převodníku UART/USB	14
Obr. 13 Zapojení pro automatickou volbu programování/spuštění programu.....	14
Obr. 14 Zapojení napájecích zdrojů.....	15
Obr. 15 Osazená deska prototypu	16
Obr. 16 Vývojový diagram programu pro ESP32	18
Obr. 17 Stavový diagram funkce menu	19
Obr. 18 Vzhled programu PLX-DAQ při testu.....	20
Obr. 19 Vzhled grafů ThingSpeak během experimentu	21
Obr. 20 Zapojení regulátoru teploty	23
Obr. 21 Fotografie provizorního pracoviště	24
Obr. 22 Konfigurace teplotních snímačů s plechovou nádobou.....	25
Obr. 23 Závislost výstupního napětí 1. senzoru na čase během kvasného procesu.....	25
Obr. 24 Závislost výstupního napětí 2. senzoru na čase během kvasného procesu.....	26
Obr. 25 Vliv množství droždí na výsledný průběh výstupního napětí 1. senzoru.....	27
Obr. 26 Vliv množství droždí na výsledný průběh výstupního napětí 2. senzoru.....	27
Obr. 27 Konfigurace teplotních snímačů se dvěma kádinkami	28
Obr. 28 Vliv množství cukru na výsledný průběh výstupního napětí senzoru	28
Obr. 29 Vliv velikosti odporu ve zpětné vazbě termodynamického senzoru	29
Obr. 30 Výsledek měření při nevhodné konfiguraci snímačů, vliv okolních podmínek	30
Obr. 31 Výsledek měření při nevhodné konfiguraci snímačů, vliv regulace teploty	31

A.2 Deska plošného spoje prototypu – top (strana součástek)



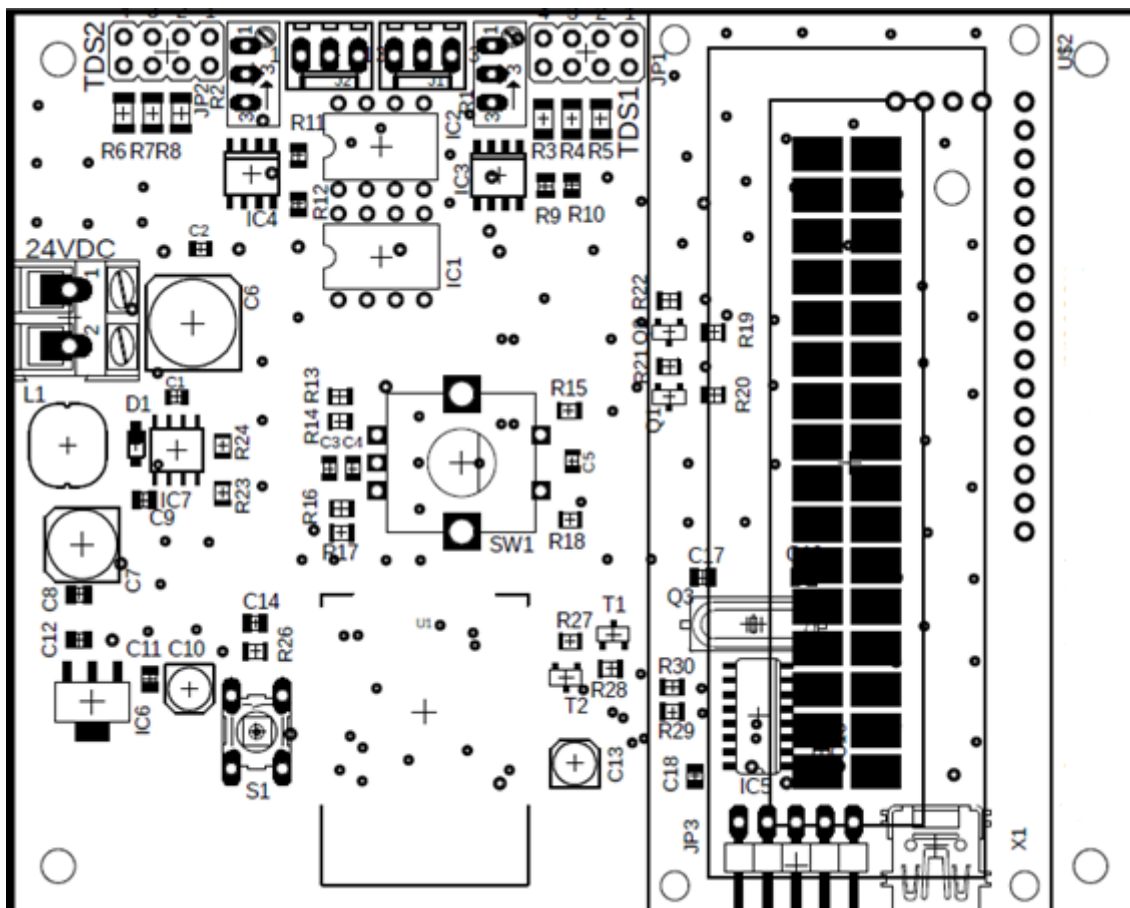
Rozměr desky 100 x 80 [mm], zvětšeno 1,65x

A.3 Deska plošného spoje prototypu – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 100 x 80 [mm], zvětšeno 1,65x

A.4 Osazovací plán prototypu



Rozměr desky 100 x 80 [mm], zvětšeno 1,65x

B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota/typ	Pouzdro	Popis
R10, R12, R13, R15, R17, R21, R22, R23, R26, R27, R28	10 k Ω	R0805	SMD rezistor
R14, R16, R18	1 k Ω	R0805	SMD rezistor
R19, R20	2,2 k Ω	R0805	SMD rezistor
R24	3,3 k Ω	R0805	SMD rezistor
R9, R11	82 k Ω	R0805	SMD rezistor
R29, R30	470 Ω	R0805	SMD rezistor
R5, R8	1 k Ω	R1206	SMD rezistor
R4, R7	2,2 k Ω	R1206	SMD rezistor
R3, R6	5,6 k Ω	R1206	SMD rezistor
R1, R2	2 k Ω	3296W	Víceotáčkový odporový trimr
C1, C2, C8, C11, C12, C14, C15, C18	100 nF	C0805	SMD keramický kondenzátor
C3, C4, C5	22 nF	C0805	SMD keramický kondenzátor
C16, C17	22 pF	C0805	SMD keramický kondenzátor
C9	10 nF	C0805	SMD keramický kondenzátor
C6	100 μ F/35 V	(8 \times 10,2) mm	SMD elektrolytický kondenzátor radiální (velikost průměr \times výška)
C7	100 μ F/16 V	(6,3 \times 5,8) mm	SMD elektrolytický kondenzátor radiální (velikost průměr \times výška)
C10, C13	100 μ F/16 V	(4 \times 5,8) mm	SMD elektrolytický kondenzátor radiální (velikost průměr \times výška)
L1	47 μ H	DLG-0705	SMD tlumivka
D1	SS24FL	SOD123	SMD Schottkyho dioda
IC1, IC2	L272M	DIL8	Operační zesilovač, THT
IC3, IC4	TL062D	SOIC8	SMD Operační zesilovač
IC5	CH340G	SOIC20	Převodník UART/USB, SMD
IC6	LM1117-3.3	SOT223	SMD lineární napěťový regulátor

IC7	TPS5410	SOIC8	SMD spínaný zdroj
Q1, Q2	BSS138	SOT23	SMD N-MOSFET
Q3	12 MHz	SM49	SMD krystalový oscilátor
T1, T2	BC817	SOT23	SMD NPN bipolární tranzistor
U1	ESP32-WROOM-32	Modul	Modul ESP32, SMD
U2	PCF8574	Modul	Modul s expandérem I ² C, osazený na desce displeje, THT
S1		B3F-10XX	Mikrospínač, THT
SW1		EC12_SW	Rotační enkodér, THT
JP1, JP2		S2G08	Kolíková lišta, 2 řady + jumper, THT
JP3		S1G05	Kolíková lišta, jednořadá úhlová, THT
J1, J2	22-27-2031	6410-03	Konektor k připojení snímačů, THT
24VDC	DG308-2.54-03P-14-00AH	(10 × 9) mm, rozteč vývodů 5 mm	Šroubová svorkovnice pro připojení napájení, THT
X1	10033526-N3212MLF	32005-201	MINI USB konektor, SMD

C PŘILOŽENÉ SOUBORY

- Výstupní soubory pro výrobu DPS
- Obslužný program pro ESP32